

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Bakalářská práce

2018

Jakub Hruban

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Výzkum obrobiteľnosti superslitin

Research on the Superalloys' Machinability

Student:

Jakub Hruban

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Hruban**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Výzkum obrobitelnosti superslitin**
Research on the Superalloys' Machinability
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Problematika obrábění superslitin.
3. Návrh vhodné metodiky zkoušek.
4. Diskuse experimentů.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOCMAN, Karel a PROKOP Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
FOREJT, Milan a PÍŠKA Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábění*. Žilina: EDIS Žilina. 2007, 243s. ISBN 978-80-8070-711-8.
SADÍLEK, M.; DUBSKÝ, J. *Obrábění I – Výběr přednášek*. 2015. VŠB – TU Ostrava, 137 s., ISBN 978-80-246-3857-1
AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Překl. M. Kudela. 1. vyd. Praha : Scientia, s. r. o., 1997. 857 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrá, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil informace a podklady z firmy Pramet Tools, s.r.o., Šumperk, firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 21. května 2018



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- Jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018.

Kenban

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Jakub Hruban

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Okružní 524, Vikýřovice, 788 13

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HRUBAN J. *Výzkum obrobiteľnosti superslitin: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže, strojírenské metrologie, 2018, 58 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Bakalářská práce se zabývá studiem obrábění superslitin jako těžkoobrobitelných materiálů. Teoretická část shrnuje rozdělení superslitin, jejich obecnou charakteristiku a oblast využití. V praktické části porovnáváme jejich mechanické vlastnosti a zaměříme se na vliv geometrie při obrábění typické niklové slitiny Inconel 718. Dále porovnáváme dva různé utvařeče z technicko - ekonomického hlediska.

ANNOTATION OF BACHLEOR THESIS

HRUBAN J. *Research on the Superalloys' Machinability: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly, Engineering Metrology, 2018, 58 p. Thesis head: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Bachleor thesis is focused on study of machining of superalloys as materials that are hard to machine. Teoretical part sums up sorting of superalloys, their common characteristic and area of utilization. In practical part of bachleor thesis is comparison of mechanical abilities and focusing on influence of geometry at machining of typical nickel alloy Inconel 718. Next we focus on two different chip breakers out of technical-ekonomic standpoint.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	9
ÚVOD	10
1 OBEČNÁ CHARAKTERISTIKA DANÉHO PROBLÉMU	11
1.1 Obrobitelnost	12
1.1.1 Vlastnosti materiálů obrobku	14
1.1.2 Creep.....	16
2 PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ SUPERSLITIN	19
2.1 Superslitiny a jejich rozdělení.....	19
2.2 Historie superslitin.....	20
2.3 Oblast využití superslitin	20
2.4 Způsoby zpracování superslitin	21
2.4.1 Druhy zpevňování	22
2.4.2 Tepelné zpracování.....	22
2.6 Titan a jeho slitiny	25
2.6.1 Zařazení v periodické soustavě prvků	26
2.6.2 Čistý titan.....	27
2.6.3 Slitiny α	28
2.6.4 Slitiny pseudo α	28
2.6.5 Slitiny $\alpha + \beta$	28
2.6.6 Slitiny pseudo β	28
2.6.7 Slitiny β	29
2.6.8 Vliv přísadových prvků na vlastnosti titanových slitin	29
2.6.9 Oblast využití titanu a jeho slitin.....	30
2.7 Slitiny na bázi železa	33
2.8 Slitiny na bázi niklu	33
2.8.1 konstrukční slitiny	33
2.8.2 slitiny se zvláštními fyz. vlastnostmi.....	34
2.8.3 slitiny žáruvzdorné	35
2.8.4 slitiny žárupevné.....	35
2.8.5 Nikl jako čistý kov.....	36
2.8.6 Vliv legujících prvků na vlastnosti niklových slitin.....	37
2.8.7 Oblast využití niklu a jeho slitin.....	38
2.9 Slitiny na bázi kobaltu	38
2.9.1 Žáropevné slitiny kobaltu	38

2.9.2	Slitiny s vysokou tvrdostí	39
3	NÁVRH VHODNÉ METODIKY HODNOCENÍ OBROBITELNOSTI	40
3.1	Diagramy porovnání mechanických a fyzikálních vlastností	40
3.1.1	Typický představitel slitiny na bázi titanu Ti6Al4V	40
3.1.2	Typický představitel slitiny na bázi železa x10NiCrAlTi32221	41
3.1.3	Typický představitel slitiny na bázi niklu Inconel 718	42
3.1.4	Typický představitel slitiny na bázi kobaltu Haynes 25.....	43
3.2	Obrábění niklové slitiny.....	44
3.2.1	Obrobitelnost niklových slitin	45
3.2.2	Slitina INCONEL 718	46
3.3	Porovnání úprav geometrie	47
4	DISKUZE EXPERIMENTŮ	50
4.1	Vzorek č. 1 – utvařec FM	50
4.2	Vzorek č. 2 – utvařec PM2	51
4.3	Vzorek č. 3 – utvařec PM5	52
4.4	Zhodnocení vlivu mikrogeometrie.....	54
4.5	Opotřebení nástroje	54
4.6	Doporučení při obrábění niklových slitin	54
5	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	55
6	ZÁVĚR	57
7	POUŽITÁ LITERATURA.....	57

Seznam použitých značek a symbolů

Zkratka/symbol	Popis	Jednotka
HRSA	Žáruvzdorné materiály	
VBD	Vyměnitelná břitová destička	
TPD	Terciální plastická deformace	
HB	Tvrdost podle Brinella	
CNN	Celostátní normy a normativy	
i_o	Index kinetické obrobitelnosti	[-]
v_c	Řezná rychlost	[m/min]
T	Čas	[s]
A	Tažnost	[%]
R_p	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
E	Yangův modul pružnosti	[GPa]
α	Alfa	
β	Beta	
γ	Gama	

ÚVOD

Superslitiny jako těžko obrobitelné materiály, jsou dnes pro výrobu různých součástí používány stále častěji. Díky vysokým mechanickým vlastnostem těchto super materiálů, které si zachovávají i v extrémních pracovních prostředích, jsou pak vysoké požadavky kladené na řezný nástroj. Mezi jejich další vlastnosti, které poměrně výrazně komplikují jejich obrábění, je nízká tepelná vodivost. To má vliv na vysoké tepelné zatížení nástroje a nástroj tak musí odolávat jak vysokému mechanickému, tak tepelnému zatížení.

Obecně se těžkoobrobitelné materiály vyznačují vysokou tvrdostí, mnohdy i nízkou hmotností a dobrou odolností proti korozi. Všechny tyto vlastnosti vedou k jejich zhoršené obrobitelnosti. U některých dochází k nalepování či tvorbě nárůstku, jiné mají zase tendenci ke zpevňování za studena, které vede ke zvýšenému namáhání a následnému zrychlenému opotřebení nástroje.

Studium těžkoobrobitelných materiálů je nezbytné zejména proto, že se uplatnění těchto materiálů stále rozšiřuje. Tyto materiály se už nepoužívají jenom v leteckém a kosmickém průmyslu, ale například také v lékařství pro výrobu tělních implantátů, v lodním průmyslu na komponenty lodí i ponorek, v automobilovém průmyslu apod, ale nachází uplatnění také při výrobě šperků.

Na trhu je celá řada vyměnitelných břitových destiček pro různé typy použití a je tedy úkolem technologa znát vlastnosti těžkoobrobitelných materiálů a následně vybrat vhodný nástroj a řezné podmínky takovým způsobem, aby obráběcí proces byl optimální z hlediska kvality, produktivity a z hlediska minimalizace výrobních nákladů.

1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA DANÉHO PROBLÉMU

Práce je zaměřena na problematiku obrábění těžkoobrobitelných materiálů, kam patří především HRSA materiály, jako jsou slitiny na bázi železa, niklu a kobaltu. Do této skupiny patří také titan a jeho slitiny.

Tyto materiály patří mezi cenově nákladnější, a i jejich výroba a práce s nimi je technologicky náročná. Mají vysoké mechanické vlastnosti, které si zachovávají i za vysokých teplot, dobrou odolnost vůči creepovým a únavovým procesům a také dobrou odolnost proti korozi a oxidaci.

Už samotné mechanické a fyzikální vlastnosti nám mohou napovědět, jak se obráběný materiál bude chovat a tudíž jaké požadavky budou kladeny na nástroj:

Mez pevnosti nás informuje o tom, jaké silové zatížení bude působit na břit.

Mez kluzu spolu s modulem pružnosti nás informuje o chování v oblasti pružných deformací před břitem nástroje a dále částečně i o jeho chování v kontaktu mezi hřbetem a obrobkem (oblast TPD).

Poměr meze pevnosti a meze kluzu, nám říká, jak moc bude obráběný materiál zpevňovat resp. přechovat (ve tváření mluvíme o tzv. zásobě plastičnosti). Tento poměr spolu s tažností nás pak informuje o tom, jak velký bude kontakt mezi třískou a čelem nástroje. A tepelná vodivost nás informuje o distribuci tepla resp. o jeho rozdělení mezi třísku nástroj a obrobek.

Díky tomu, že tyto materiály si zachovávají své vysoké mechanické vlastnosti za vysokých teplot nemůžeme respektive můžeme pouze ve velmi omezené míře využít efektu odpevnění jako je tomu například u ocelí (zejména nástrojových).

Přes tyto negativní jevy je v současnosti stále větší procento součástí konstruováno právě z těchto materiálů. Jen stěží lze nalézt náhradu za materiál s takto unikátní kombinací vlastností, aby splňoval zároveň i podmínku lepší obrobitelnosti. Proto je třeba zaměřit se spíše na správný výběr technologie zpracování, nástrojů, vhodných rezných podmínek atd.

1.1 Obrobitelnost

Obrobitelnost materiálu je z hlediska technologii třískového obrábění jedna z jeho nejdůležitějších vlastností. Je možno ji definovat jako míru schopnosti daného materiálu být zpracováván technologií obrábění. Není snadné definovat obrobitelnost daného materiálu absolutní hodnotou nějaké veličiny. Jedná se totiž o souhrnný vliv fyzikálních vlastností i chemického složení materiálu na průběh a ekonomické i kvalitativní výsledky procesu obrábění. Obrobitelnost však dále závisí i na způsobu obrábění, zvolených řezných podmínkách (řezná rychlost, posuv, řezné prostředí) a na geometrii břitu řezného nástroje. [1]

Technické a konstrukční materiály jsou dle CNN (Celostátní normy a normativy) děleny do následujících skupin:

- a – litiny
- b – oceli
- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi)
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku)
- e – plastické hmoty
- f – přírodní nerostné hmoty
- g – vrstvené hmoty
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců

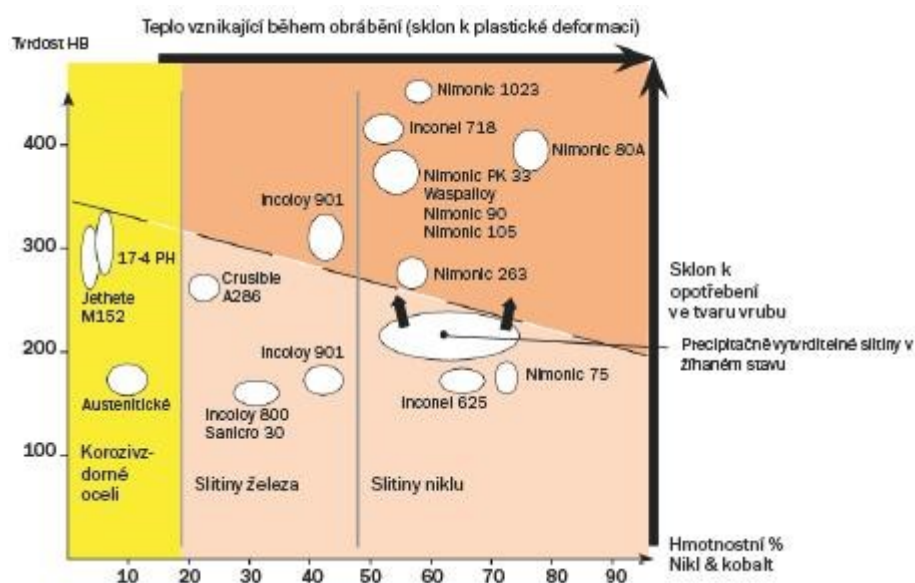
V každé skupině je jeden konkrétní materiál označen za etalon, ke kterému je následně určována relativní obrobitelnost všech ostatních materiálů ve skupině. Materiály každé skupiny jsou proto dále děleny do jednotlivých tříd obrobitelnosti na základě tzv. indexu kinetické obrobitelnosti:

$$i_o = \frac{v_{c15}}{v_{c15et}}$$

kde v_{c15} je řezná rychlost nástroje při jeho trvanlivosti $T = 15$ minut pro analyzovaný materiál a v_{c15et} je řezná rychlost nástroje při jeho trvanlivosti $T = 15$ minut pro etalonový materiál. Třída etalonového materiálu má tedy hodnotu $i_0 = 1$. [1]

Jednotlivé třídy obrobiteľnosti jsou označovány číslicemi, umístovanými před písmeno dané skupiny. Materiály ve třídách s nižším číslem mají horší obrobiteľnost a materiály s číslem vyšším mají naopak obrobiteľnost lepší. Jednotlivé třídy jsou odstupňovány dle střední hodnoty indexu obrobiteľnosti, který je u ocelí: $q = 10^{(1/10)} = 1,26$. Hodnota řezné rychlosti v_{cT} v sousední třídě je 1,26x vyšší nebo nižší. [1]

Z hlediska technologie obrábění je obrobiteľnost jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu. Je hlavním činitelem pro volbu řezných podmínek a pro funkci nástroje při všech metodách obrábění. Obrobiteľnost závisí na mnoha faktorech. [2]



Obr. 1: Celkové grafické shrnutí obrobiteľnosti [3]

Mezi hlavní faktory ovlivňující obrobiteľnost patří [4]:

- způsob výroby
- tepelné zpracování materiálu
- chemické složení – vliv příměsí
- metoda obrábění
- řezné podmínky
- geometrie nástroje – kvalita břitu
- upnutí nástroje – kvalita držáku
- přítomnost metalurgických vměstků

Lepší obrobiteľnost lze dosáhnout změnou některých z výše uvedených faktorů. Obrobiteľnost se zjišťuje pomocí praktických zkoušek, při kterých je třeba uvážit [4]:

- mikrostrukturu materiálu
- sklon materiálu k ulpívání na břit nástroje
- typ obráběcího stroje
- stabilitu
- hlučnost
- životnost nástroje

Kombinací znalostí materiálu a výsledků praktických zkoušek obrábění lze získat dobrý základ hodnocení obrobitelnosti. Podle typu výroby může tento základ, který se vztahuje buď na jednotlivý speciální případ obrábění, nebo na celou výrobu, podstatně zlepšit chod výroby. [4]

1.1.1 Vlastnosti materiálů obrobku

Mezi nejdůležitější vlastnosti ovlivňující chování obráběného materiálu vůči nástroji [4,5]:

- Tvrdost a pevnost
- Houževnatost
- Pružnost
- Plasticita
- Tvárnost
- Tepelná vodivost
- Zpevnění za studena
- Vměstky
- Přísady pro zlepšení obrobitelnosti

Tvrdost

Odolnost materiálu proti vnikání cizího tělesa (schopnost odolávat tlaku bez deformace). [5]

Pevnost

Odolnost materiálu pro trvalému porušení soudržnosti částic. [5]

Houževnatost

Odolnost materiálu vůči vzniku deformace nebo porušení. Mírou houževnatosti je množství mechanické práce potřebné k vytvoření deformace nebo k porušení materiálu. [5]

Pružnost

Schopnost materiálu deformovat se před porušením pružně. Pružná deformace je vratná, při odlehčení se rozměry tělesa vrátí na původní hodnoty. Při pružné deformaci neplatí zákon zachování objemu. [5]

Plasticita

Schopnost materiálu deformovat se před porušením plasticky. Plastická deformace je deformace nevratná a při odlehčení se rozměry tělesa nevrátí na původní hodnoty. Při plastické deformaci platí zákon zachování objemu. [5]

Tvárnost

Pozitivní vliv mají většinou nízké hodnoty tvárnosti. Příznivě se podílejí na tvorbě třísky. Vzniká krátká tříska s dobrou lámavostí. Při takto utvářené třísce lze lépe využít výkon motoru obráběcího stroje. S tažností úzce souvisí i tvrdost. Platí, že čím větší vykazuje materiál hodnoty tvrdosti, tím menší jsou hodnoty tažnosti a naopak. Platí, že dobrá obrobiteľnosť je většinou vhodným kompromisem mezi tvrdostí a tažností materiálu. [4]

Tepelná vodivost

Pokud obráběný materiál vykazuje vysoké hodnoty tepelné vodivosti, znamená to, že teplo vznikající při obrábění materiálu je rychle odváděno z místa řezu. Z hlediska obrobiteľnosti jsou tedy vyšší hodnoty tepelné vodivosti výhodné. [4]

Zpevňování za studena

Zpevňování za studena vzniká při plastickém tváření kovů, kdy dochází ke zvyšování pevnosti. Rychlost, jakou je daný materiál zpevňován, ovlivňuje výslednou tvrdost materiálu. Platí, že čím rychleji probíhá zpevňování materiálu, tím rychleji probíhá zvyšování pevnosti v poměru k úbytku deformační rychlosti. Kromě rychlosti, jakou zpevňování za studena probíhá, závisí pevnost také na tom, jaké sklony daný materiál obrobku má ke zpevňování za studena. Materiály, u kterých dochází ke vzniku velké rychlosti tváření za studena, jsou austenitické korozivzdorné oceli a některé žáropevné slitiny. Naopak materiály, jako jsou uhlíkové oceli, jsou typickými představiteli materiálů,

u kterých tváření za studena probíhá velmi pomalu. Čím vyšší je hodnota rychlosti zpevňování materiálu plastickou deformací za studena, tím větší je nutné vynaložit úsilí, na utváření třísky. Dalším výsledkem zpevňování materiálu tvářením za studena, je vznik výrazně tvrdší vrstvy na povrchu obrobku, která má za následek silné namáhání břitu. Vhodnou změnou geometrie břitu lze měnit zatížení břitu. [4]

Vměstky

Makrovměstky jsou takové vměstky, u kterých se jejich velikost pohybuje okolo 0,15 mm. Jsou typickým znakem pro méně kvalitní oceli, pocházející z nečistot v peci, případně z nedostatečného odstranění strusky. Tyto vměstky bývají obvykle velmi tvrdé a mají značně abrazivní účinek na břit obráběcího nástroje. Z tohoto důvodu je vhodné zvolit jiný typ materiálu, ve kterém se tyto vměstky nevyskytují. [4]

Mikrovměstky jsou obsaženy v každém materiálu. Jejich dělení je možné provést následovně [4]:

- Nežádoucí vměstky jsou oxidy hliníku (Al_2O_3) a karbidy titanu (TiC). Jsou tvrdé a abrazivní.
- Méně žádoucími vměstky jsou oxidy železa a manganu (FeO , MnO). Mají vyšší hodnotu tváření než předchozí skupina.
- Žádoucí vměstky jsou takové vměstky, které při řezném procesu vytvářejí díky svým vlastnostem příznivé prostředí. Typickým příkladem jsou silikáty, které měknou při vysokých rychlostech vznikajících při obrábění a v zóně řezu vytvářejí vrstvu, která snižuje opotřebení břitu nástroje.

1.1.2 Creep

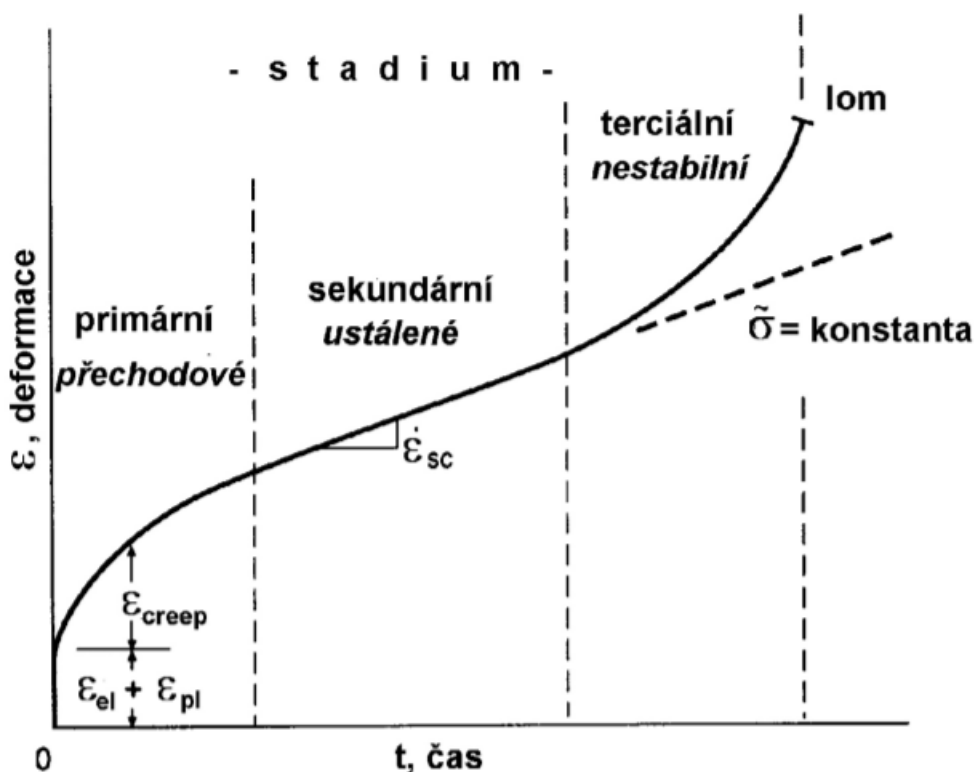
Jako jedna z dominantních vlastností materiálů na bázi superslitin je zmiňována odolnost vůči tečení (creepu).

Tečení je děj, při kterém dochází k plastické deformaci po dlouhodobém teplotním zatížení. Creepová deformace je pomalá, spojitá a probíhající v čase. Creep je tedy funkcí napětí, času a teploty a má vliv na mechanické vlastnosti při teplotách (30-60) % absolutní teploty tání. Zpravidla způsobí urychlení únavového procesu. [6]

Při nízkých teplotách a nízkých napětích má křivka tečení jen jednu oblast, nastává tedy přechodové tečení, které brzy téměř úplně zaniká. Často se označuje jako logaritmické

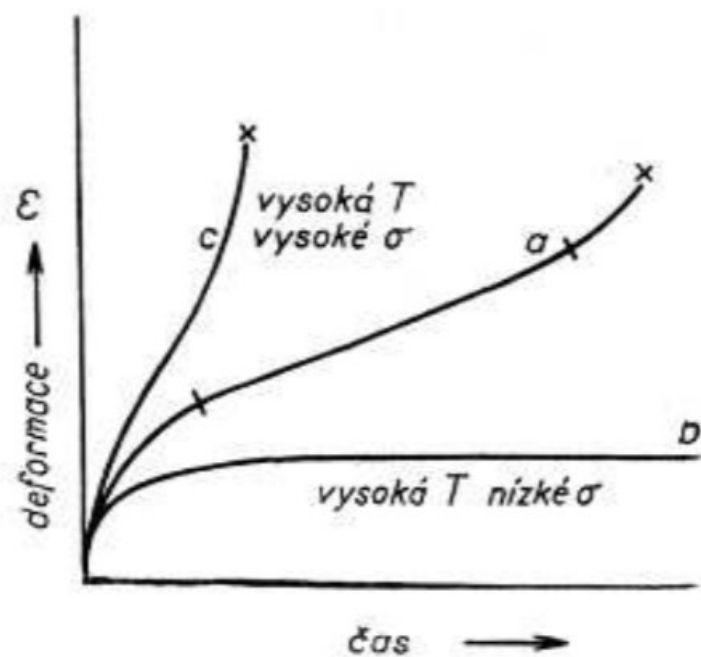
tečení, které má charakter nízkoteplotního jevu u superslitin až do $0,5 T_t$, a proto v průmyslové praxi nastane jen velmi ojediněle. [6]

Superslitiny se používají při vysokých teplotách, kde se už jedná jen o vysokoteplotní creep, ve kterém se objevují tři stádia tečení. Jedná se o teploty u superslitin až nad $0,6 T_t$. Veliký vliv má ovšem i napětí. Creepová křivka vzorku podrobeného tečení při vysokých teplotách a vysokých napětích má z počátku prudkou přechodovou oblast, potom se ustálí, nastává rovnoměrné tečení a poté následuje terciální (zrychlené nestabilní) tečení a lom. [6]



Obr. 2: Creepová křivka a znázorněná stádia tečení [7]

Tvar creepových křivek bývá různý, v závislosti na hodnotách teploty a napětí, které hlavně ovlivňují terciální tečení. Rozdílné tvary křivek jsou patrné na obrázku zejména u křivek b a c. Křivka a se značí jako teoretická křivka. [7]



Obr. 3: Typy křivek tečení [7]

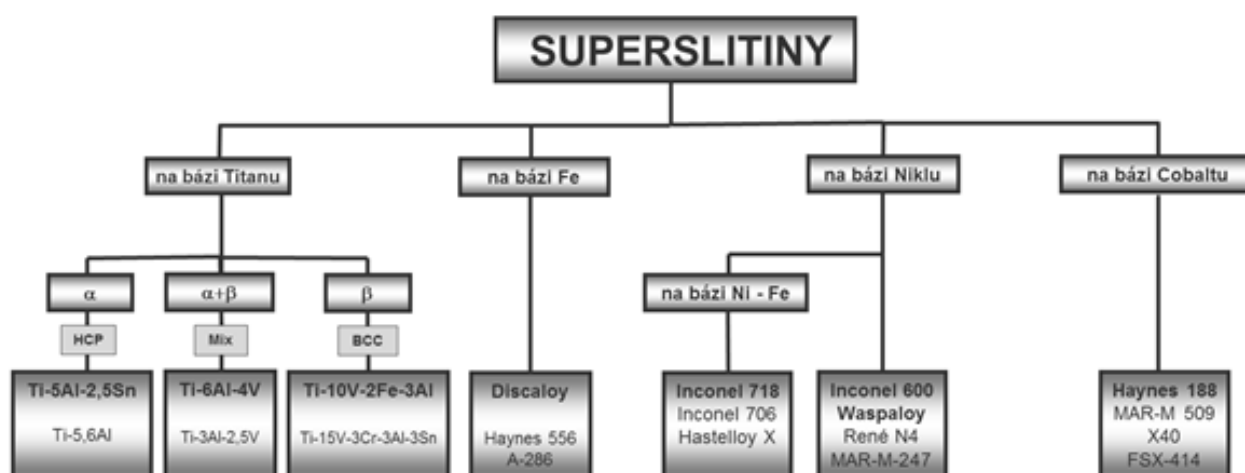
2 PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ SUPERSLITIN

2.1 Superslitiny a jejich rozdělení

Superslitiny jsou podle normy ISO 513, která rozděluje materiály do šesti základních skupin, kdy každá z těchto skupin vyvolává kvalitativně stejný typ zatížení namáhání břitu a podobný typ opotřebení nástroje, zařazeny do skupiny „S“, která je dále rozdělena na slitiny Titanu a HRSA (tedy superslitiny na bázi Fe, Ni a Co). [5]

Pro své unikátní vlastnosti jsou tyto materiály stále častěji používány v různých odvětvích našeho průmyslu. Své uplatnění nacházejí zejména tam, kde je kladen požadavek zejména na vysokou pevnost, houževnatost a zejména provozní spolehlivost a to i za extrémně vysokých či naopak velmi nízkých teplot, nebo i korozně agresivních prostředích. Dále se využívá vlastností těchto materiálů i tam kde je důležitá hmotnost výsledných komponentů, jako je kosmický, letecký, automobilový průmysl, nebo i medicínské aplikace. [5]

V jednoduchosti můžeme materiály skupiny „ISO S“ rozdělit podle chemického složení, které můžeme vidět na obrázku. [5]



Obr. 4: Rozdělení superslitin na základě chemického složení [5]

2.2 Historie superslitin

Vývoj superslitin se datuje už z období těsně před 1. světovou válkou, kdy se začaly hledat materiály vhodné pro letecké motory. Nejdříve se používaly korozivzdorné chrom-niklové oceli, avšak s postupem času a požadavky vyšších výkonů motorů, se nároky konstruktérů na použitý materiál stále zvyšovaly. Potřeba nových slitiny s lepšími vlastnostmi se ještě zvýšila s rodícím se výzkumem turbín. Vhodnou možností zpevnění matrice se časem ukázalo zpevnění pomocí precipitace. Na konci 20.let 20.století byl objeven a patentován zpevňující účinek titanu a hliníku u austenitických chrom-niklových ocelí, avšak podstata tohoto efektu intermetalika $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ označovaného jako γ' , byla objevena až mnohem později a to v roce 1957 pomocí rentgenové difrakce. [8]

Superslitiny, i díky 2. světové válce, zaznamenaly prudký rozvoj a v roce 1940 byla patentována ve Velké Británii první niklová superslitina NIMONIC. V dalších letech bylo hlavní snahou dosáhnout vyššího objemového podílu zpevňující fáze γ' ve struktuře a snížit obsah nežádoucích křehkých fází. Na obrázku 1 je patrné, jak se s touto snahou měnil obsah některých prvků. Díky vysokým reaktivitám titanu a hliníku bylo nutno měnit i výrobní technologie. Především se jednalo o nutnost používání vakuových pecí. S vyšším objemovým podílem γ' fáze však klesá tvárnost, a proto je nezbytné slitinu odlévat. Jednou z nejdůležitějších aplikací jsou lopatky rotorů turbín, u kterých jsou požadované dobré creepové vlastnosti. Ty se v posledních desetiletích výrazně zlepšily díky technice usměrněné krystalizace odlitků. Získala se tak kolumnární struktura krystalů orientovaných ve směru osy lopatky. S rozvojem slévárenských technologií se začaly vyrábět monokrystaly, které díky absenci hranic zrn mají vynikající creepové vlastnosti a posunuly tak provozní teploty znatelně výše. [8]

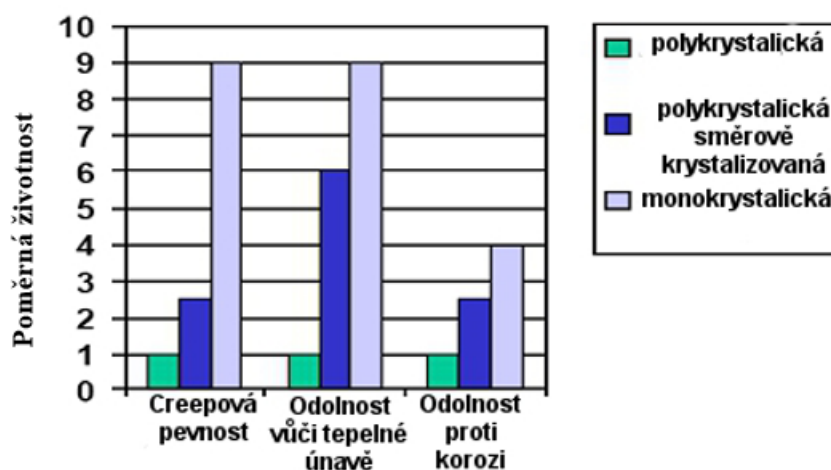
2.3 Oblast využití superslitin

Spektrum využití superslitin je velmi rozsáhlé, zahrnuje především letecký průmysl, kde jsou využívány na různé komponenty a spalovacích motorů. V elektrárnách na některé komponenty parních turbín. Neméně významným odvětvím je automobilový průmysl, kde jsou superslitiny využívány na turbodmychadla a výfukové systémy. Dále jsou to nástroje a matrice pracující v nadměrných teplotách a matrice pro odlévání ve strojírenském průmyslu nebo zařízení pro tepelné zpracování kovů. Využití najdou také v medicíně, například jako protézní přístroje nebo dokonce jako zubní náhrada. V neposlední řadě je to

chemický a petrochemický průmysl. Význam superslitin na současném trhu je dobře prokazatelný skutečností, že zatímco v roce 1950 byla z celkového váhového množství leteckého motoru s plynovou turbínou zhotoveno asi jen 10 %, rokem 1985 toto číslo stoupl o 50 %. Jejich vysoká pevnost společně s odolností proti korozi udělala ze superslitin jisté standardní materiály pro biomedicínké zařízení. Superslitiny lze také poměrně dobře využít v kosmonautice, kde se teploty pohybují hluboko pod bodem mrazu. [9]

2.4 Způsoby zpracování superslitin

Superslitiny jsou obvykle zpracovány tak, že optimalizací se zajišťují určité přednostní vlastnosti oproti jiným. Z obecného hlediska jsou superslitiny buďto pouze odlévány nebo při vhodném složení dále tvářeny kováním, válcováním nebo lisováním. Jejich vlastnosti je dále možné optimalizovat, takže při stejném chemickém složení mohou být litém nebo tvářené slitiny zpracovány různým tepelným nebo tepelně mechanickým zpracováním. Pro vybraná složení může být superslitina připravena rovněž v monokrystalické formě. Můžeme se tak setkat s tím, že pro stejný tvarový produkt bylo pro dané nominální složení docíleno prostřednictvím optimalizovaného tepelného zpracování, tedy v závislosti na mikrostruktuře a technologii přípravy, výrazně rozdílných vlastností, zejména pokud se týká např. meze kluzu a odolnosti vůči creepu (Obr.5). Odlévané superslitiny mají hrubozrnnější mikrostrukturu, segregaci legujících prvků a vyšší odolnost vůči creepu a lomovému porušení, mohou být dále pouze svařovány nebo pájeny natvrdo. Tvářené superslitiny jsou obecně homogennější s jemnozrnnější strukturou a lepšími tahovými a únavovými vlastnostmi. Monokrystalické slitiny jsou schopny pracovat 100h při tlaku 140 MPa při teplotě o 50°C vyšší než běžné polykrystalické formy. [10]



Obr. 5: Srovnání creepové pevnosti, odolnosti proti tepelné únavě a odolnosti proti korozi pro tři typy struktur superslitin: polykrystalickou, krystalickou sloupcovou a monokrystalickou. [10]

2.4.1 Druhy zpevnňování

Dobré mechanické vlastnosti těchto super materiálů lze ještě zvýšit zpevnňováním a proto ve stručnosti uvádím stručný výčet způsobů zpevnňování, které se používají. [5]

Deformační

Při tvárné deformaci roste hustota dislokací a dochází k jejich vzájemnému působení, velké zpevnění při zhoršené tvárnosti a houževnatosti. [5]

Tuhého roztoku

Rozpustí-li se atomy příměsí v tuhém roztoku (matrici), vytváří se kolem nich pole napětí, které brání pohybu dislokací při plastické deformaci, čímž se zvyšuje pevnost tuhého roztoku. [5]

Na hranici zrn

Pevnost či tvrdost materiálů roste s klesající velikostí zrn v jejich struktuře (s rostoucí plochou hranic zrn). [5]

Precipitační

Je to v podstatě zpevnění částicemi jiných fází. Precipitace neboli srážení je reakce, při níž v roztoku vzniká jedna nebo více pevných látek (známých jako sraženina čili precipitát). [5]

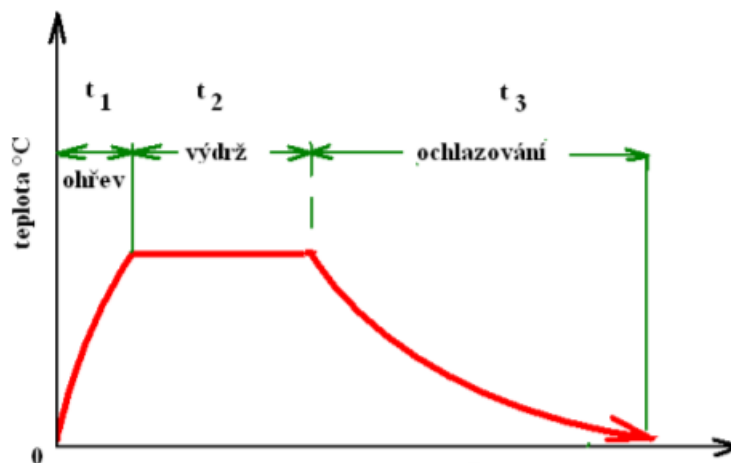
Disperzní

Disperzní zpevnění – zpevnění částicemi cizího původu. [5]

2.4.2 Tepelné zpracování

Tepelným zpracováním rozumíme všechny postupy, při nichž materiál v tuhém stavu cíleně ohříváme a ochlazujeme určitým způsobem tak, aby získal požadované vlastnosti. Ovlivňujeme tím mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, tažnost, vrubovou houževnatost a

odolnost proti opotřebení). Dosažení rovnovážného stavu při fázových změnách v tuhém stavu je zcela určeno difuzí. Proto je pro výsledek tepelného zpracování rozhodující, jaký vliv bude mít průběh difúze. Průběh difúze je ovlivněn jednak teplotou a jednak výdrží (dobou) na určité teplotě, při níž ještě difúze může probíhat. [11]



Obr. 6: Obecný diagram tepelného zpracování [11]

Druhy tepelného zpracování:

1. Žíhání
2. Kalení
3. Popouštění

1) Žíhání

Žíhání je způsob tepelného zpracování, kterým chceme u součásti dosáhnout stavu blízkého stavu rovnovážnému za účelem zlepšení některých vlastností jako je například povrchová tvrdost. Provádí se při teplotách blízkých teplotě počátku tavení po delší dobu a následným ochlazením na volném vzduchu. [11]

Druhy žíhání:

a) Naměkko

Účelem je zmenšení pevnosti a tvrdosti, zlepšení schopnosti ke tváření za studena. [11]

b) Na odstranění vnitřního pnutí

V materiálu dochází k hromadění vnitřního pnutí např. po obrábění, po tepelném zpracování, po svařování. Toto vnitřní pnutí se dá právě tímto způsobem žíhání odstranit. [11]

c) Rekrystalizační

Při zotavení, které probíhá všeobecně za nízkých teplot (teplota 550° až 700°C), zůstává mikrostruktura deformovaného kovu nezměněna a také orientace mřížky v jednotlivých zrnech zůstává v podstatě zachována. Ani hustota mřížkových poruch se výrazněji nemění. Při tomto pochodu mizí původní deformovaná zrna a vznikají zrna nová, jejichž tvar, velikost a orientace mřížky jsou odlišné od zrn původních. [11]

d) Normalizační

Normalizační žíhání je nejčastěji používaným a nejdůležitějším postupem. Jeho cílem je dosažení rovnoměrné a jemné struktury bez vnitřních pnutí a s dobrými mechanickými vlastnostmi. Prohřátí musí být dostatečně dlouhé, aby vznikl homogenní austenit. Potom se materiál ochladí na vzduchu. [11]

2) Kalení

Kalíme proto, abychom dosáhli vyšší, případně maximální tvrdosti výrobku, pevnosti v tahu nebo jeho odolnosti proti opotřebení. Kalená součást má vyšší tvrdost, ztrácí však houževnatost a proto se stává křehčí. [11]

3) Popouštění

Provádí se především po kalení, účelem popouštění je odstranit pnutí v materiálu po předchozím tepelném zpracování aniž by se snížila jeho tvrdost. [11]

Druhy popouštění – a) za nízkých teplot – teploty do 250°

b) za vyšších teplot – teploty nad 450°

a) Za nízkých teplot

Účelem snížit vnitřní pnutí po kalení a zlepšit houževnatost. Martenzitická struktura zůstane zachována, mění se jen krystalická mřížka. [11]

b) Za vyšších teplot

Účelem je získat strukturu s příznivějšími mechanickými vlastnostmi, zejména s velkou houževnatostí při vysoké mezi kluzu. Popouští se co nejdříve po kalení, kdy je nebezpečí praskání největší. Kombinaci kalení a popouštění za vyšších teplot nazýváme zušlechťování. [11]

2.6 Titan a jeho slitiny

Titan je 7. nejrozšířenější kov v zemské kůře. Je šedý až stříbřitě bílý, lehký a tvrdý kov. Je dobrým vodičem tepla i elektřiny. Vyznačuje se mimořádnou chemickou stálostí – je zcela netečný k působení vody a atmosférických plynů a odolává působení většiny běžných minerálních kyselin i roztoků alkalických hydroxidů. Za zvýšených teplot titan přímo reaguje s většinou nekovů, například s vodíkem, kyslíkem, dusíkem, uhlíkem, borem, křemíkem, sírou a halogeny. [12]

Obrobitelnost je velmi obtížná, protože vlivem kyslíku a dusíku z atmosféry bývá často povrch obrobku křehký. Titan disponuje také nízkou tepelnou vodivostí, která zapříčiňuje nalepování na břit obráběného nástroje a tím jeho rychlejší otupení. Existuje rovněž šance vzplanutí titanových třísek. [13]

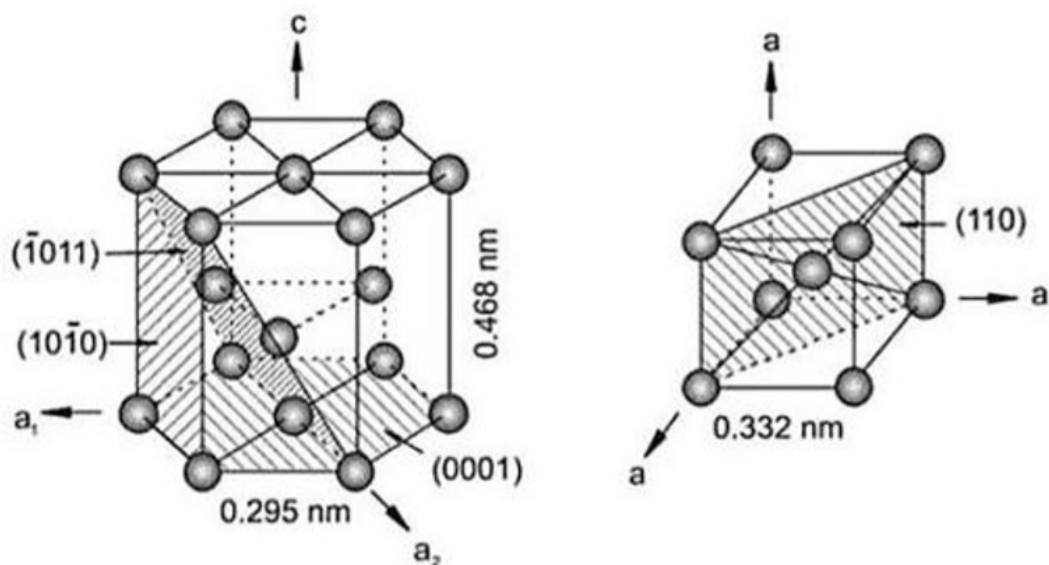
Dalším nedostatkem titanu je jeho vysoká cena. Je až třikrát dražší než legovaná ocel a pětikrát dražší než hliník. Kvůli jeho špatným vlastnostem, zejména špatné třecí vlastnosti, se nemůže používat pro spojení typu šroub-matice. Na druhou stranu slitiny titanu spadají mezi nejlepší konstrukční a antikorozi materiály. [14]

vlastnosti titanu. Oproti ostatním kovům ve stejné periodě má menší měrnou hmotnost a vyšší teplotu tání. Nejčastěji se vyskytuje jako čtyřmocný. [17]

2.6.2 Čistý titan

Titan s vysokou čistotou až 99,9%Ti má pevnost v tahu až $R_m=250$ MPa a tažnost až $A=60\%$. Při nižší čistotě zvyšují nečistoty (O, N, C) pevnost až na 550 MPa, tažnost však současně klesá až na 20 %. Nejvyšší teplota pro dlouhodobé použití silově zatíženého titanu je asi 300 °C. [18]

Čistý titan prochází alotropickým přetvořením fáze α s mřížkou hexagonální těsného uspořádání do fáze β s mřížkou kubickou prostorově centrovanou při teplotě 882,5 °C. Přísadové prvky mohou řídit stabilizaci buď fáze α , nebo fáze β . Pomocí přísadových prvků může být fáze β dostatečně stabilizovaná, aby existovala současně s fází α za pokojové teploty. Tato skutečnost tvoří základ pro vytvoření slitin titanu, které mohou být posíleny tepelným zpracováním. [18]



Obr. 9: Struktura titanu fáze α s mřížkou hexagonální těsného uspořádání a fáze β s mřížkou kubickou prostorově centrovanou [19]

2.6.3 Slitiny α

Jsou charakteristické stabilní strukturou, dobrou pevností a odolností proti křehkému lomu i za velmi nízkých teplot. Odolávají oxidaci až do teplot okolo 600 °C, jsou lépe svařitelné a obrobitelné. Nevýhodou je poměrně velká vodíková křehkost. Hlavními přísadami slitin jsou prvky hliník, zirkon a cín. Jako tepelné zpracování se obvykle používá pouze žíhání. Využití slitin je známé v součástech plynových turbín, leteckém a chemicko-zpracovatelském průmyslu. [18,19]

2.6.4 Slitiny pseudo α

Kromě α -fáze obsahují díky přidání malého množství β -stabilizátorů 2 - 8 % β -fáze. Kromě uvedených vlastností α -slitin mají díky přítomnosti β -fáze lepší plasticitu a menší citlivost k vodíkové křehkosti. Možnost použití je i za teplot okolo 500 °C. Pevnost se mění (v závislosti na obsahu hliníku) od 500 MPa (1 % hliníku) do 1100 MPa (7 % hliníku). Ze slitin pseudo α se vyrábí součásti kompresorů letadel. [18,19]

2.6.5 Slitiny $\alpha + \beta$

Dvoufázové heterogenní slitiny $\alpha + \beta$ jsou nejpočetnější skupinou. Mají lepší tvárnost a odolnost proti únavovému namáhání než slitiny α i pseudo α . Jejich svařitelnost a lomová houževnatost je však horší, ale jsou lépe obrobitelné. Podíl β -fáze se pohybuje v rozmezí 5 - 50 %. Mechanické vlastnosti jsou zásadně ovlivněny podmínkami tepelného zpracování. Základní slitinou nejen této skupiny, ale i všech slitin titanu se stala TiAl6V4, na jejíž výrobu se spotřebuje asi 50 % veškeré produkce titanu. Využívají se na výrobu součástí leteckých motorů, tlakových nádob, kryogenních součástí, zbraní, leteckých turbín, atd. [18,19]

2.6.6 Slitiny pseudo β

Slitiny obsahují přibližně 20% β -stabilizátorů, zejména železo a chrom, které tvoří intermetalické fáze. Jsou velmi dobře tvárné, lze je tedy využít pro kování nebo lisování součástí složitějšího tvaru. Používají se převážně v žíhaném stavu. [18,19]

2.6.7 Slitiny β

Vícesložkové slitiny mají vysokou odolnost proti korozi, tvárnost, tuhost a pevnost (po žíhání 1100 MPa, v zušlechtěném stavu až 1400 MPa), ale nízký modul pružnosti. Díky velkému množství legujících prvků mají větší měrnou hmotnost a jejich výroba je velmi nákladná a obtížná. Může nastat mikrostrukturní nestabilita a intersticiální shluky. Díky BCC krystalické mřížce jsou nejvhodnější ke tváření. Oblast jejich využití je však poměrně úzká (vysoce pevné svorníky a panely letadel a kosmických lodí). [18,19]

2.6.8 Vliv přísadových prvků na vlastnosti titanových slitin

Železo (Fe)

Nejznámější slitinou titanu se železem je ferotitan TiFe_2 , který absorbuje kyslík a také dusík. Jinak je železo v titanových slitinách považováno za nečistotu, která se v nich objevuje při redukci. Při obsahu pod 0,1% je jeho vliv zanedbatelný. [13]

Molybden (Mo) a chrom (Cr)

Primárním cílem těchto přísadových prvků je zvýšení pevnosti žárupevnosti. Slitiny titanu s molybdenem jsou až tisíckrát odolnější proti působení chemických sloučenin než čistý titan. [13]

Hliník (Al)

Slitiny titanu s hliníkem jsou hodně důležité pro průmysl. Hliník zvyšuje žárupevnost, snižuje hmotnost i cenu. Hliník stabilizuje α -titan a zvyšuje jeho pevnost a modul pružnosti při zachování plasticity a houževnosti. [13]

Mangan (Mn)

Ve slitině titanu zvyšuje mangan její pevnost a také zlepšuje její plasticitu. [13]

Měď (Cu)

Už při malém množství tohoto prvku ve slitině titanu a mědi zvyšuje její žárupevnost.[13]

2.6.9 Oblast využití titanu a jeho slitin

Vzhledem k vysoké korozní odolnosti se tyto slitiny používají v chemickém a potravinářském průmyslu. Větší využití však titanové slitiny zaujímají v leteckém a kosmickém průmyslu. Neméně významným odvětvím je automobilový průmysl, kde jsou titanové slitiny využívány na turbodmychadla a výfukové ventily. Dále jsou to nástroje a matrice pracující v nadměrných teplotách a matrice pro odlévání ve strojírenském průmyslu nebo zařízení pro tepelné zpracování kovů. Využití najdou také v medicíně, jako například protézní přístroje nebo náhrada zubů. [20]

2.6.10.1 Titan v letectví a kosmonautice

Postupně, zvyšováním rychlosti letadel, které přišlo po druhé světové válce s vynálezem nadzvukových strojů, začaly do té doby běžně používané materiály, nedostačovat tepelnému zatížení od tření vzduchu o části letadel. Titan a jeho slitiny se používají na součástky motorů, draků i přístrojů. U motorů jsou to především různé části kompresorů, disky, rotory, prstence a skříně kompresorů. [17]



Obr. 10: Letoun blackbird – téměř celá konstrukce využívá slitiny titanu [21]

Významnou měrou je titan využíván v kosmickém průmyslu. Výzkumy vesmíru si již bez titanových slitin těžko dokážeme představit - sondy, družice, raketoplány i mezinárodní vesmírná stanice jsou z větší části vyrobeny právě z Ti slitin. [13]



Obr. 11: 85 % struktury raketoplánu tvoří Ti slitiny [22]

2.6.10.2 Titan v lékařství

V lékařství se uplatňuje titan díky chemické stálosti, dobrým mechanickým vlastnostem i malé měrné hmotnosti. Titan se nemění ve styku s tkání, dá se dobře spojit s kostí, přičemž není žádné nebezpečí vzájemných reakcí. Z titanu se tedy vyrábějí různé šrouby, destičky, dlahy, lékařské nástroje, protézy, kloubní náhrady apod. [17]



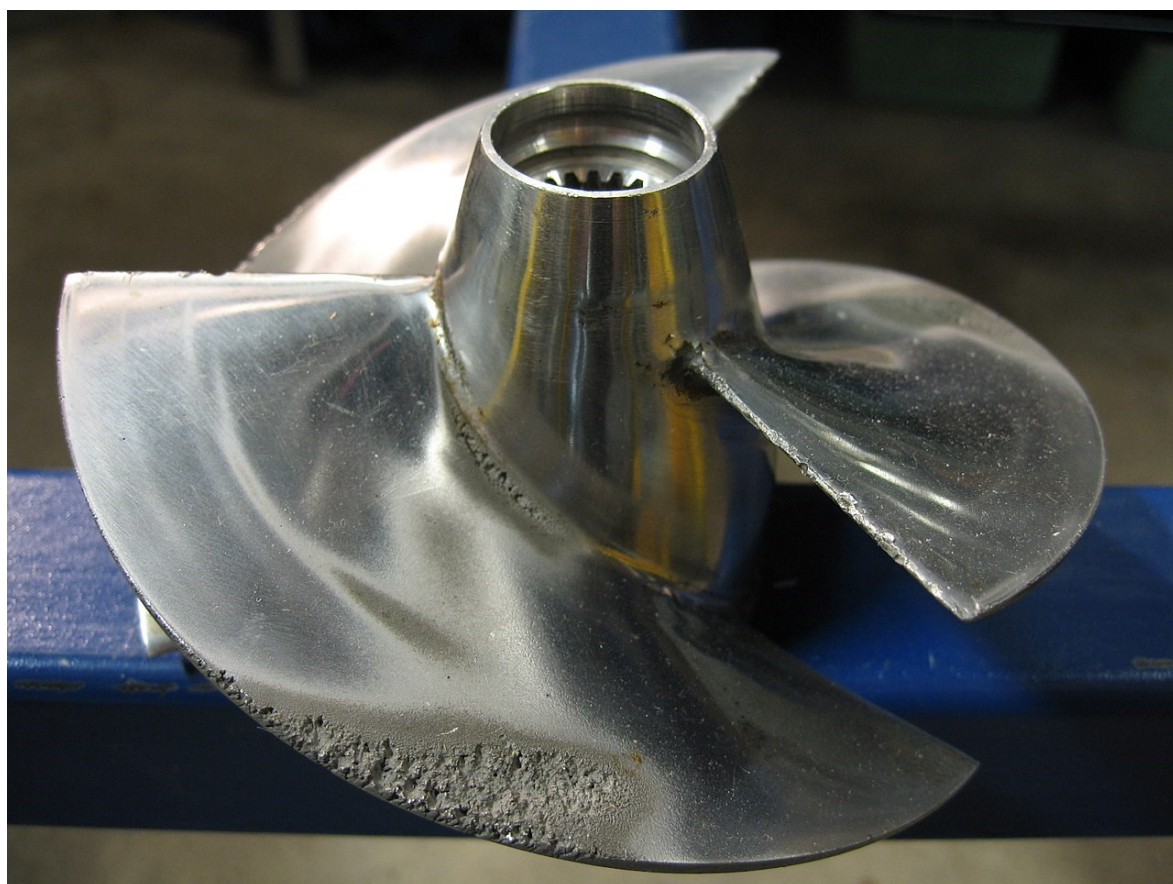
Obr. 12: Titanová dlaha [23]

2.6.10.3 Strojírenský průmysl

Titanové slitiny jsou hojně používány v chemickém průmyslu k výrobě rozprašovačů, kotlů, výměníků tepla, van, nebo filtrů. Na stěnách nádob nevznikají usazeniny, výměníky mají stále čisté stěny a nesnižuje se tak jejich účinnost.

V automobilovém odvětví se používají titanové slitiny k výrobě součástek motorů, nosných částí karosérie nebo výfukového systému.

V říční a námořní dopravě se kromě snížení hmotnosti využívá i odolnost titanu proti korozi. Při stavbě, lodí, plachetnic, člunů a ponorek se titan a jeho slitiny hodí na výrobu např. napáječek pro kotle, výfukové tlumiče, výměníky, kondenzátory, lodní šrouby, anténní stožáry, radarová zařízení apod. [17]



Obr 13: Lodní šroub s kavitačním opotřebením [24]

2.7 Slitiny na bázi železa

Jejich základní složkou je Fe. Obsahují však více Cr a Ni než běžné austenitické korozivzdorné oceli. V porovnání se slitinami na bázi Ni a Co jsou lépe obrobitelné. Příčinou je především větší pokles tvrdosti za vyšších teplot. Některé z těchto slitin jsou austenitické. Tepelným zpracováním lze jejich obrobitelnost výrazně zlepšit. Obrobitelnost slitin zpevněných za studena lze žíháním na měkko nebo žíháním na odstranění vnitřních pnutí zlepšit. Příliš měkké slitiny jsou náchylné ke vzniku nárůstků. Podle obsahu uhlíku se slitiny dělí na:

- Do 2,11% C – železa kujná (oceli)
- Nad 2,11 % C – železa nekujná (šedá litina, surová železa)
- Ocel je slitina železa, uhlíku a dalších legujících prvků, která obsahuje méně než 2,14 % uhlíku [5]

2.8 Slitiny na bázi niklu

Slitiny niklu se vyznačují dobrou žárupevností za vysokých teplot, žáruvzdorností a vynikající odolností proti korozi, čímž do značné míry převyšují vlastnosti běžně používaných ocelí a jejich hlavní přísadou je nikl. Jsou obecně pevnější, tvrdší a houževnatější než většina neželezných kovů. Avšak díky jejich unikátním a žádoucím vlastnostem patří slitiny niklu mezi materiály, které mají v porovnání s jinými kovovými materiály za daných řezných podmínek zhoršenou obrobitelnost.

Jsou určeny pro součástky používané za vysokých teplot a také při napět'ovém namáhání (např. součásti leteckých turbínových motorů, spalovacích turbín energetických jednotek).

Podle použití je rozděluje na slitiny konstrukční, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi, slitiny žáruvzdorné a žárovevné. [13]

2.8.1 konstrukční slitiny

Ni - Cu

Označení pod obchodním názvem Monel nebo Nicorros (67 % Ni + 30 % Cu) + + malé přísady Si, Al, Fe, Mn. Vyznačují se výbornou odolností proti korozi. Mají dobrou

houževnatost, ale také tepelnou vodivost. Po vytvrzení mají vysokou pevnost (až 1200 MPa) za normální i zvýšené teploty. [13]

Ni - Be

Obsah beryllia bývá zpravidla do 2%. Po vytvrzení dosahují pevnosti až 1800 MPa. Tyto slitiny jsou použitelné zhruba do teploty 500°C např. na pružiny, membrány a trysky. [13]

Ni - Mn

Prísada manganu zlepšuje to, že tyto slitiny výborně odolávají korozi i za vyšších teplot a také v prostředích, která obsahují síru. Často se používají na elektrody zapalovacích svíček. [13]

Ni - Mo

Tyto slitiny mohou obsahovat až 35% molybdenu. Jsou vhodné pro odlitky, které odolávají koroznímu prostředí, kde působí kyselina sírová, ať už studená, nebo horká. Dojde k vytvoření poměrně silné pasivační vrstvy na povrchu materiálu. Používají se zejména v potravinářském průmyslu. [14]

Ni - Co

Kobalt do obsahu až 4,5%. Kobalt zvyšuje magnetické vlastnosti, například permeabilitu. Použití nacházejí v ultrazvukových zařízeních a v elektronice. [13]

Ni - Al

Možnost je precipitačně vytvrdit na pevnost, která potom dosahuje hodnot až 1350 MPa při obsahu 4,5% hliníku. Tento materiál se používá na pružiny. Další uplatnění nacházejí tyto slitiny zejména při výrobě pump, hřídelí a oběžných kol. [13]

2.8.2 slitiny se zvláštními fyz. vlastnostmi

1) Termočláňkové slitiny

Jako termočláňkové slitiny se používají slitiny niklu s chromem, kterého obsahují zhruba 9 - 12%. Také známé pod názvem chromel. Dalšími slitinami jsou:

- alumel (Ni-Al-Mn-Si)
- konstantan (Ni-Cu-Mn) v poměru složení 40-58-2%

- kopel (Ni-Cu-Mn) se složením 43-56,5-0,5%

Zejména chromel a alumel tvoří termočlánek pro teplotní rozsah 300 - 1000°C. [13]

2) Odporové slitiny

Základní slitinou je Ni + 20% Cr. Jsou nazývány nichrom, chromnikl nebo pyrochrom. Tyto slitiny jsou tvárné, hodí se na výrobu drátů, tyčí a pásů. S vyšším obsahem chromu je také vyšší žárupevnost a žáruvzdornost. Používají se také pro topné odpory do teploty 1150°C. [13]

3) Magneticky měkké slitiny

Jsou označovány pod názvem permalloy. Kromě niklu obsahují také železo, případně molybden, měď, chrom a křemík. Vyznačují se vysokou a stálou permeabilitou. Používají se jako materiály pro jádra transformátorů měřicích zařízení. [13]

2.8.3 slitiny žáruvzdorné

Žáruvzdorné slitiny niklu jsou substitučně a karbidicky zpevněné. To má za následek, že za vyšších teplot nejsou schopny dlouhodobě odolávat mechanické zátěži. Mají krátké druhé stádium tečení, dochází u nich k rychlému tečení a teplené roztažnosti. Z těchto důvodů se používají k výrobě statických součástek leteckých motorů (např. lopatky statorů). Tyto slitiny mají však výbornou žáruvzdornost, odolávají korozi a oxidaci za vysokých teplot.

Jsou to slitiny na bázi Ni-Cr a nebo Ni-Cr-Fe. Množství chromu bývá v rozmezí 10 až 30%. Je to základní přísadový prvek, který dodává superslitinám korozivzdornost. Množství železa u Ni-Cr-Fe bývá okolo 5-20%.

2.8.4 slitiny žárupevné

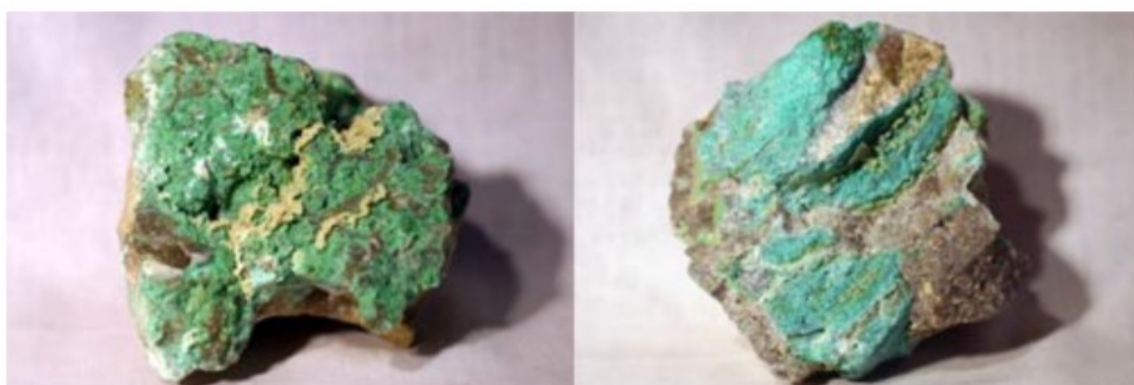
Do této skupiny patří slitiny na bázi Ni-Cr-Co, které obsahují další přísady, jako jsou hliník a titan, popřípadě molybden, wolfram nebo niob. používají na nejnamáhanější součásti parních a spalovacích turbín.

2.8.5 Nikl jako čistý kov

Typický ferromagnetický, kujný a tažný kov bílé barvy. Ve sloučeninách se vyskytuje především v mocenství Ni^{+2} . Vůči působení vzduchu i vody je nikl poměrně stálý a používá se proto často k povrchové ochraně jiných kovů, především železa. Je také značně stálý vůči působení alkálií a používá se proto k výrobě zařízení pro práci s alkalickými hydroxidy neboli louhy.

V přírodě ho lze najít v několika možných formách. V ryzí formě je poměrně vzácný a nachází se především společně se železem ve formě oxidů (laterit, garnierit), nebo jako sulfid-nikelnato-železitý (pentlandit). Jeho výroba je velmi složitá a v konečné fázi se většinou získává oxid nikelnatý (NiO), který je dále redukován koksem a čištěn elektrolýzou.

Mechanické vlastnosti niklu závisí na jeho čistotě, případně na dalším legování. Komerčně čistý nikl (Nikl 200) dosahuje meze kluzu v tahu 148 MPa a pevnosti v tahu 462 MPa při tažnosti 47 %. Modul elasticity (Youngův modul) je blízký ocelím (204 GPa). Výhodou pro aplikace niklu je nejen dobrá zpracovatelnost za tepla i studena, ale zejména to, že si nikl i jeho slitiny zachovávají pevnostní charakteristiky do poměrně vysokých teplot. Mechanické vlastnosti niklu rostou s klesající teplotou a při $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosahuje 1,5x vyšší pevnosti. Rekrytalizace nastává při $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nad $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ silně klesá pevnost, teplota tání je $1455\text{ }^{\circ}\text{C}$. [13,14]



Obr. 14: garnierit $(\text{Ni}, \text{Mg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$ [13]

2.8.6 Vliv legujících prvků na vlastnosti niklových slitin

Nikl je schopný rozpouštět v sobě velké množství legujících prvků zejména chróm, molybden a wolfram, což umožňuje jeho aplikace i v mnohem agresivnějších prostředích. V následujícím výčtu vybraných příměsí jsou uvedeny konkrétní účinky na vlastnosti slitin niklu. [10]

Měď

Zlepšuje odolnost vůči neoxidačním kyselinám.

Chrom

Zvyšuje odolnost vůči oxidačním prostředím, dále vůči vysokoteplotní oxidaci (vznik pasivačního filmu na povrchu). Obsahy Cr se pohybují do 50%, běžně je to okolo 15-30% Cr.

Železo

Snižuje především náklady a cenu slitiny, nezlepšuje však antikorozi vlastnosti niklu. Železo také zvyšuje rozpustnost uhlíku v niklu a tím odolnost vůči vysokoteplotnímu nauhličení.

Kobalt

Obdobně jako Fe zvyšuje rozpustnost uhlíku v niklu, čímž zvyšuje odolnost vůči vysokoteplotnímu nauhličení, dále zvyšuje odolnost vůči vysokoteplotnímu nasíření.

Molybden

Zvyšuje odolnost vůči neoxidačním kyselinám. Molybden zvyšuje odolnost vůči bodové a štěrbinové korozi. Je důležitým zpevňujícím prvkem pro slitiny se zvýšenou pevností při vysokoteplotních aplikacích.

Wolfram

Zvyšuje obdobně jako Mo odolnost vůči neoxidačním kyselinám a lokální korozi. Je rovněž výrazně zpevňujícím prvkem, avšak má vyšší atomovou hmotnost a je dražší, proto se, pokud to není vyloženě nutné volí raději Mo, příp. kombinace W a Mo.

Křemík

Je v niklu přítomný jen v malých množstvích buď jako zbytkový prvek z dezoxidačního procesu, anebo jako záměrný přídavek pro zlepšení odolnosti vůči vysokoteplotní oxidaci. [10]

2.8.7 Oblast využití niklu a jeho slitin

Hlavní oblast využití je v leteckém průmyslu - vysokoteplotní a nejvíce namáhané součásti leteckých turbínových motorů, a to jak odlitky, tak tvářené výrobky. Z odlitků především lopatky, integrálně litá kola. Z tvářených výrobků oběžná a rozváděcí kola pomocných energetických jednotek, spalovací komory apod.

V oblasti energetiky jsou to především součásti spalovacích a parních turbín. Turbodmychadla a výfukové ventily v automobilovém průmyslu. Nástroje používané pro práci v nadměrných teplotách. Tepelně namáhané pláště a části raketového motoru v kosmonautice. Hnací mechanismy regulačních tyčí a armatury reaktorů v jaderné energetice. Potrubí a reaktory v chemickém a petrochemickém průmyslu. [9]

2.9 Slitiny na bázi kobaltu

Tyto slitiny jsou nejhůře obrobitelné ze všech slitin skupiny „S“. Jejich hlavní složkou je kobalt, ale mají také vysoký obsah chromu, niklu a wolframu. Vyznačují se vysokou pevností za vysokých teplot a silným sklonem ke zpevnění za studena. Na rozdíl od slitin niklu lze jejich obrobitelnost ovlivnit tepelným zpracováním jen velmi málo. Dá se říci, že čím více přísadových prvků, tím je pevnost za tepla vyšší a obrobitelnost horší.

Příkladem superslitiny na bázi kobaltu je: HAYNES 25 - slitina se substitučním zpevněním matrice

Kobaltové slitiny se dělí na žárovevné slitiny, slitiny s vysokou tvrdostí a magneticky tvrdé slitiny. [18]

2.9.1 Žáropevné slitiny kobaltu

Základem je tuhý roztok Co-Cr-Mo-Ni. Přičemž neprobíhá precipitační vytvrzování sloučeninami s hliníkem a titanem. Díky absenci titanu a hliníku, což jsou prvky s vysokým sklonem k oxidaci, nemusíme používat vakuové lití jako u slitin niklu a titanu. Uplatňuje se

zde pouze mechanismus substitučního zpevnění matrice a dispersním zpevnění hrubými částicemi karbidů.

Žárupevné kobaltové slitiny jsou dobře slévateľné. Jsou obtížněji zpracovateľné než slitiny niklu. Při jejich tváření je obvykle potřeba mezižihání.

Používají se na lopatky plynových turbín. Pokud je obsah chrómu nízký zhruba do 3 hm.%, je možnost použití v kosmonautice pro raketové motory. [18]

2.9.2 Slitiny s vysokou tvrdostí

Slitiny kobaltu s vysokou tvrdostí se nazývají stelity. Jsou to slitiny Co-Cr-W s malým množstvím C, Si a Fe. Stelity jsou charakteristické vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení i za vysokých teplot. Tyto slitiny nelze tvářet, pouze odlévat a navařovat. Navařovány jsou především na plochy, které jsou vystaveny kavitaci a další namáhané plochy při vysokých teplotách jako jsou náběžné hrany lopatek parních turbín. [18]

2.9.3 Slitiny pro tvrdé magnety

Jelikož je kobalt feromagnetický kov, využívá se také pro slitiny, které jsou používány pro tvrdé magnety. Mezi nejznámější patří slitiny železa s kobaltem Fe-Co, kde železo je zastoupeno 60-65 hm. %. Případně je používán ve slitinách s mědí a niklem Cu-Ni-Co, kde je kobalt zastoupen přibližně 30 hm. %, tyto slitiny lze tvářet za studena [18]

3 NÁVRH VHODNÉ METODIKY HODNOCENÍ OBROBITELNOSTI

Na obrobitelnost mají velký vliv mechanické a fyzikální vlastnosti daného materiálu. V následujících tabulkách jsem znázornil a graficky porovnal tyto vlastnosti referenčního materiálu pro oceli (materiál 12 050.1) s referenčními materiály pro jednotlivé skupiny těžkoobrobitelných materiálů.

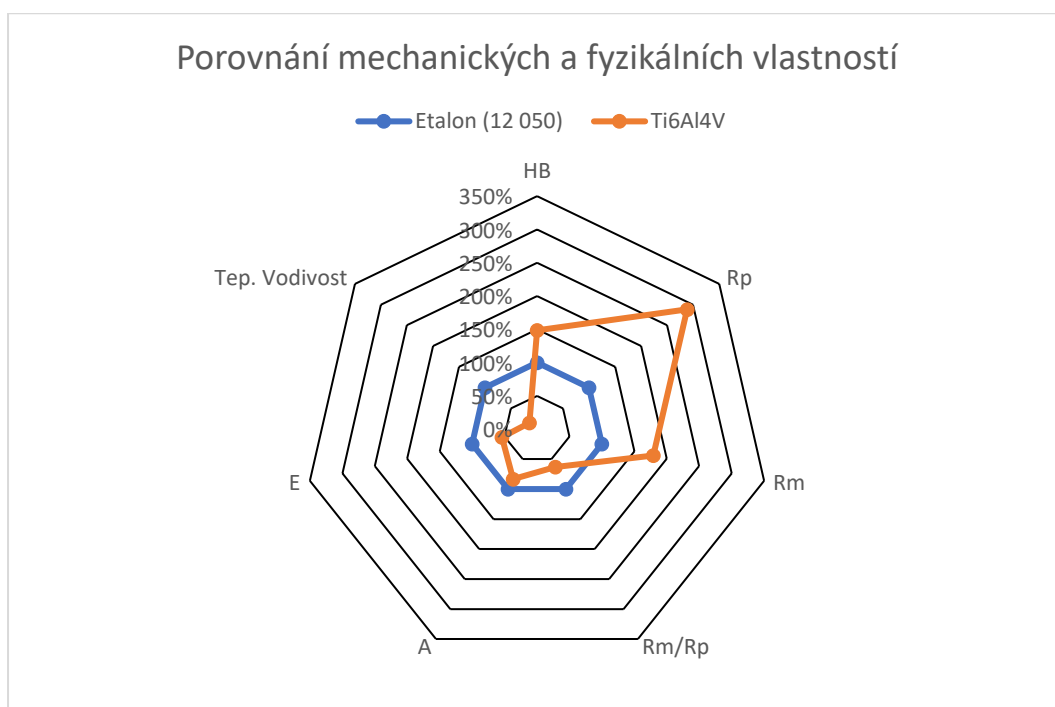
Tabulka 1: Mechanické a fyzikální vlastnosti vybraných materiálů.

	Referenční materiál 12 050.1	Ti6Al4V	x10NiCrAlTi32221	Inconel 718	Haynes 25
Tvrdost HB	225	334	192	370	277
Mez kluzu Rp	305	880	200	920	505
Mez pevnosti Rm	530	950	525	1240	1015
Rm/Rp	1,74	1,1	2,6	1,35	2,01
Tažnost A	18	15	52	25	60
Modul pružnosti E	211	114	196,5	205	225
Tep. Vodivost	49	7,2	11,5	6,4	9,4

3.1 Diagramy porovnání mechanických a fyzikálních vlastností

3.1.1 Typický představitel slitiny na bázi titanu Ti6Al4V

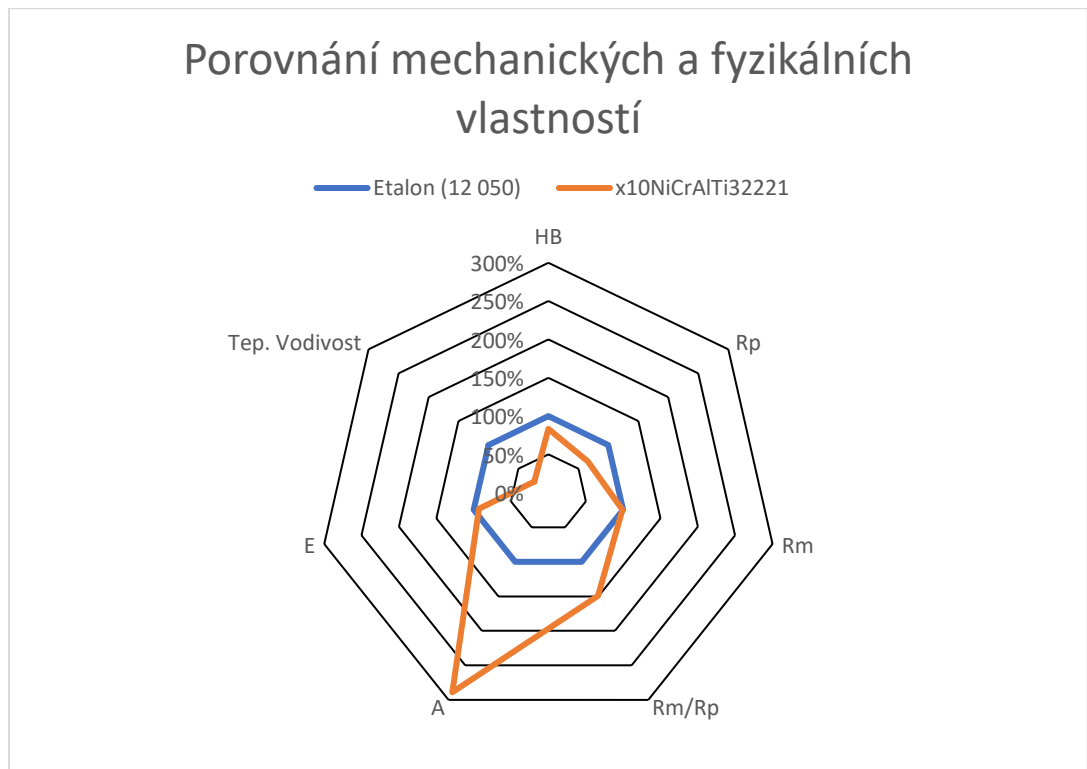
U tohoto materiálu můžeme říci, že na něj bude působit více abrazivní opotřebení, a to hlavně díky vyšší tvrdosti, než je oceli 12 050.1. Vyšší mez pevnosti a kluzu nám říká, že tenhle materiál bude vyvolávat větší silové namáhání bříty tzn., že nám budou na břit působit daleko větší síly. Poměr Rm/Rp je menší než u oceli a to znamená, že přechování tohoto materiálu bude menší. Prakticky to znamená, že když bude menší přechování, tak špona bude tenčí a bude se pohybovat po čele vyšší řeznou rychlostí. Tažnost máme o trochu menší tzn. délka kontaktu třísky s čelem bude v tomto případě o něco kratší než u oceli. Modul pružnosti je podstatně nižší než u oceli. V praxi to znamená, že tento materiál bude pod hřbetem v oblasti terciální plastické deformace daleko více dopružovat. Tepelná vodivost je výrazně nižší a tzn., že daleko méně tepla se mi podaří dostat do třísky a daleko více tepla půjde do nástroje. U tohoto materiálu vlivem nízké tepelné vodivosti, krátkým kontaktem třísky s čelem a dopružením mi hrozí odpálení bříty.



Obr 15: Porovnání mech. a fyz. vlastností materiálu 12 050.1 s Ti6Al4V

3.1.2 Typický představitel slitiny na bázi železa x10NiCrAlTi32221

Co se týče pevnosti u tohoto materiálu, tak bude působit méně abrazivně než typická konstrukční ocel. Z poměru R_m/R_p vyplývá, že je větší a tento materiál bude více přechovat tzn. že bude vyžadovat větší prostor pro třísku. Velkým problémem je tady vysoká tažnost. Pokud ji máme několikanásobně vyšší, tak se materiál hodně rozprostře po čele nástroje (hodně dlouhý kontakt třísky s čelem). To by nás mělo vést k tomu, aby jsme nějakým způsobem zkrátili kontakt třísky s čelem. Toho můžeme docílit pozitivnější geometrií, nebo vhodnou volbou utvařeče. Modul pružnosti je stejný, takže se bude chovat podobně jako u oceli. Tepelná vodivost je nižší a pokud se nám podaří zkrátit kontakt třísky s čelem, riskujeme propálení destičky, protože dojde k lokální koncentraci sil.

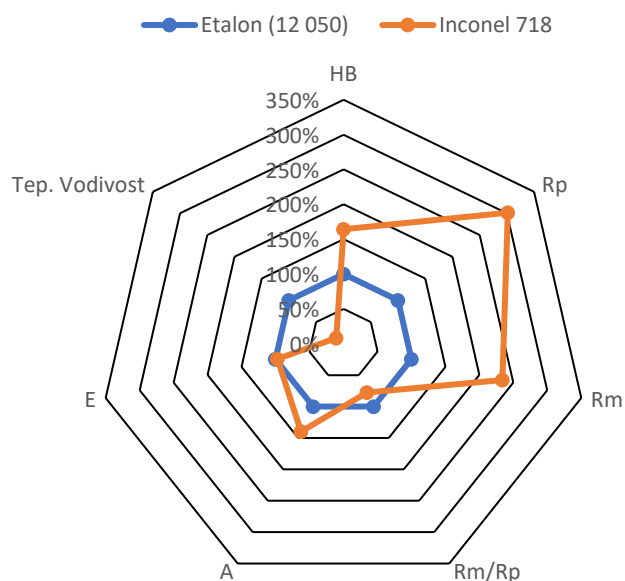


Obr 16: Porovnání mech. a fyz. vlastností materiálu 12 050.1 s x10NiCrAlTi32221

3.1.3 Typický představitel slitiny na bázi niklu Inconel 718

Díky větší tvrdosti bude působit abrazivněji. Silové zatížení bude více jak dvojnásobné. Poměr R_m/R_p je mírně nižší, takže bude o trochu méně pěchovat. Můžeme tedy použít podobnou geometrii jak u oceli. U tohoto materiálu musíme řešit kontakt třísky s čelem, protože vidíme, že tažnost je o něco vyšší. Problém je opět v tepelné vodivosti. Můžu použít geometrii, která by byla vhodná pro oceli, ale musím použít nižší řezné podmínky. Mez kluzu nám vlastně říká, jak blbě se bude břit nástroje do materiálu vřezávat. Potřebujeme tedy ostřejší geometrii. Tepelná vodivost nižší a opět nám to říká že budeme muset drasticky snižovat řeznou rychlost.

Porovnání mechanických a fyzikálních vlastností

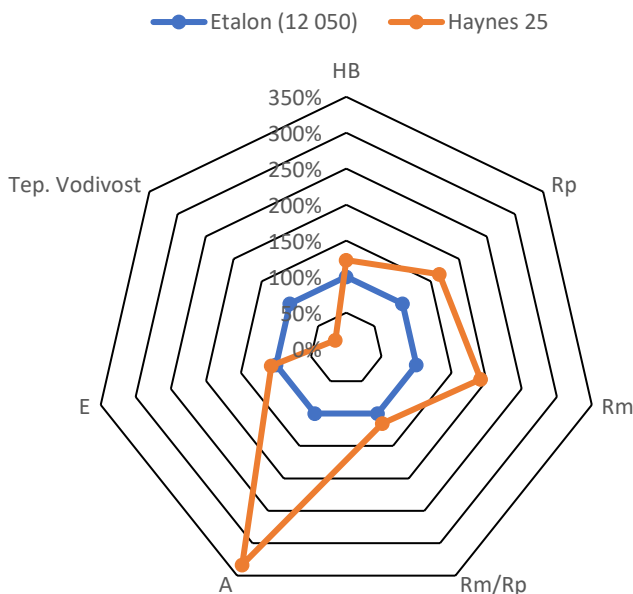


Obr 17: Porovnání mech. a fyz. vlastností materiálu 12 050.1 s Inconel 718

3.1.4 Typický představitel slitiny na bázi kobaltu Haynes 25.

Tento materiál by měl být ve své podstatě nejhůře obrábitelný. Především díky špatné tepelné vodivosti. Tvrdost mírně nižší. Poměr R_m/R_p je jenom mírně vyšší tzn. nebudou kladeny tak vysoké nároky na šířku žlábků. Problémem tady je dlouhý kontakt třísky s čelem, který musím nějakým způsobem regulovat. např. tím, že použiju pozitivnější geometrii a nebo tam musí být nějaký utvařec. V oblasti sekundární plastické deformace (A) se nám bude generovat hodně tepla.

Porovnání mechanických a fyzikálních vlastností



Obr 18: Porovnání mech. a fyz. vlastností materiálu 12 050.1 s Haynes 25

S ohledem na šířku pojednávané problematiky se v další části své práce soustředím pouze na typického představitel skupiny S, tedy na niklovou slitinu známou pod obchodním označením INCONEL 718

3.2 Obrábění niklové slitiny

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů klade speciální požadavky na geometrii nástroje a na řezné podmínky. Při obrábění těchto superslitin vzniká velmi často opotřebení ve tvaru vrubu na konci záběru v důsledku obrábění zpevněné povrchové vrstvy. Dalším velmi častým jevem je plastická deformace břitu v důsledku lokální koncentrace řezných sil (a tedy i teplot) v oblasti blízké břitu. A naprosto běžným a typickým projevem opotřebení je otěr hřbetu, který je ovlivněn zejména mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu.



Obr. 19: Poškození břitu nástroje ve tvaru vrubu [21]

3.2.1 Obrobitelnost niklových slitin

Slitiny na bázi niklu jsou podstatně hůře obrobitelné, než slitiny na bázi železa nebo titanu. Obrobitelnost niklu a niklových slitin je velmi rozličnou záležitostí. Při obrábění se vytváří opotřebení na hřbetě VBD a také současně žlábek na čele VBD. K velmi strmému poklesu jakosti obrobené plochy dochází v důsledku zvyšování rezné rychlosti. Oproti tomu velikost posuvu nemá vliv na hodnotu drsnosti povrchu obrobené plochy. Bylo také zjištěno, že nástroj tíhne k opotřebení ve formě žlábků při nízkých rychlostech řezání, avšak opotřebení špičky nástroje je menší.

Velmi důležitou součástí procesu obrábění niklu a niklových slitin je použití mazání nebo chladicí kapaliny. Velmi často se používají oleje, které obsahují síru, protože síra zlepšuje kluzné vlastnosti a také tvorbu třísky. V poslední době bylo zkoumáno využití kryogenního chlazení při obrábění, což představuje chlazení za pomoci mrazivého proudu vzduchu.

Pokud dochází k obrábění vysokými rychlostmi, jako je například frézování, soustružení a podobně, doporučuje se používání chladicí kapaliny. Nejčastěji se užívají emulze na základě vody, protože mají lepší chladicí efekt než již zmiňované oleje se sírou. Při obrábění nižšími rychlostmi jako například vrtání, protahování a podobně se používají zejména velmi hustá maziva a také chemické chladicí kapaliny. Při vrtání je lepší použít rozředěný roztok kvůli odvodu vytvořené třísky.

Při frézování lze také využít trochoidní frézování, které může být efektivnější, jelikož zabráňuje vysoké míře kontaktu mezi destičkou a obrobkem a je prevencí proti velkému úhlu opásání. To vzniká při přísuvu nebo profilování rohů kruhovými destičkami. Při vysokém úhlu opásání vzniká vysoký řezný tlak na nástroj. Proto musí být snížen posuv nástroje. Při trochoidním frézování dochází k obrábění bez zbytečných rázů s hladkým řezem po optimalizované dráze s nižším úhlem opásání. Zvláště pokud jsou použity menší hloubky řezu, můžeme zvýšit rychlost posuvu. [14]

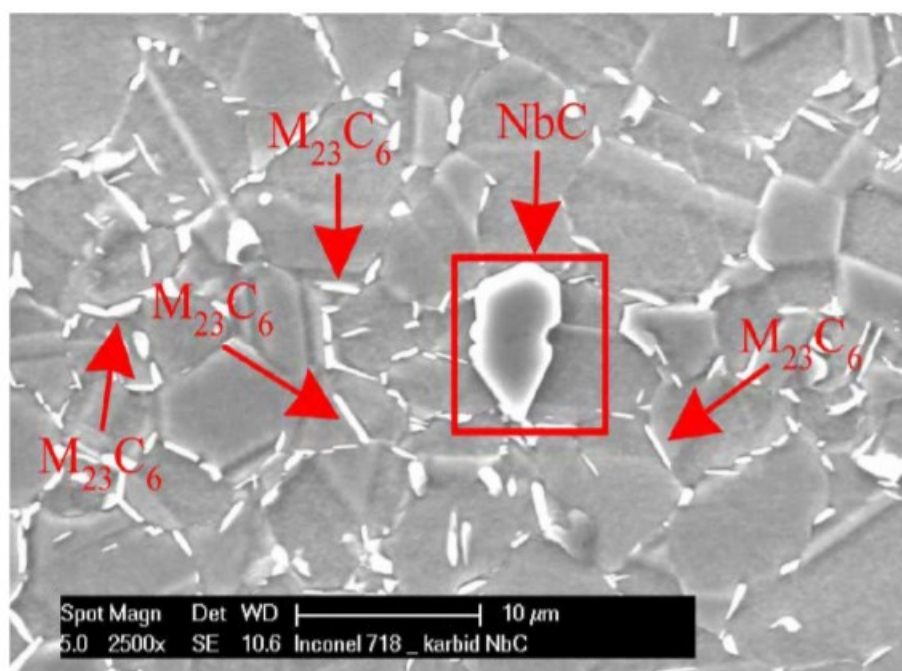
3.2.2 Slitina INCONEL 718

Vyznačuje se vysokou mezí pevnosti (R_m nad 1000 MPa při 20 °C) a vynikající odolností proti tečení do teplot kolem 705 °C a proti oxidaci kolem 980°C. Absence většího množství Mo může způsobit větší náchylnost ke štěrbinové nebo důlkové korozi.

Při tváření za tepla patří materiál k jednomu z těch nejhůře tvárným vzhledem k jeho vysoké pevnosti. Inconel 718 lze tvářet za teplot asi 900-1120°C s použitím výkonných strojů, které budou schopny vytvořit dostačující tlaky.

Tváření za studena není problémem, lze použít klasické metody tak jako pro oceli. Obrábět se slitina dá, ale musí se dbát na velkou pevnost, zpevnění a tvrdost materiálu, kterým je obráběn.

Materiál dosahuje vyšších mechanických vlastností při kombinaci tváření za studena a následném tepelném zpracování než pouze ve vytvrzeném stavu. INCONEL 718 je jedna z nejpopulárnějších žárovevých slitin používaných především v extrémních podmínkách na plynové turbíny, proudové motory, části reaktorů, skladování plynů za kryogenních teplot. [25]



Obr. 20: Struktura materiálu Inconel 718. [13]

Materiál dosahuje vyšších mechanických vlastností při kombinaci tváření za studena a následném tepelném zpracování než pouze ve vytvrzeném stavu. INCONEL 718 je jedna z nejpopulárnějších žárovevných slitin používaných především v extrémních podmínkách na plynové turbíny, proudové motory, části reaktorů, skladování plynů za kryogenních teplot.

Tabulka 2: Chemické složení Inconelu 718 [25]

INCONEL 718	Prvek (v % hmotnosti)							
	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Cu
	50,0 – 55,0	17,0 – 21,0	zůstatek	2,8 – 3,3	4,75 – 5,5	1,0	0,35	0,2 – 0,8
	Prvek (v % hmotnosti)							
	Al	Ti	Si	C	S	P	B	
	0,65 – 1,15	0,3	0,35	0,08	0,015	0,015	0,006	

3.3 Porovnání úprav geometrie

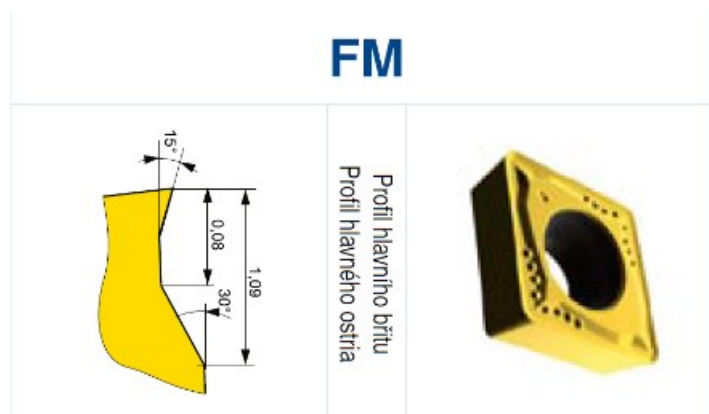
Ze zkušebny firmy Pramet Tools s.r.o.mi byl poskytnut tento protokol o obrábění materiálu Inconel 718.

DORMER PRAMET		PROTOKOL ZKUŠEBNÝ O OBRÁBĚNÍ								
		Číslo 1060								
Navazuje na zkoušku										
Úkol	Číslo	059 120	Řešitel		Zapsal					
	Název		Datum		Operátor CNC					
Stroj	Typ	S 80i/1000	Požadavek - popis			Technologie	S			
	Výkon [kW]	20,5 kW								
	Techn.stav	100%								
Obrobek	Požadovaná drsnost		Trvanlivost - super alloys (ISO S)							
	Materiál-Norma	Inkonel 718								
	Skupina	S								
	Pevnost [MPa]									
	Tvrdost HB	368 HB								
	Tvrdost HRC									
Nástroj	Označení	SCLCR 1616 H09								
	Poznámka	Průměr				Počet destiček				
	Rezná rychlost [m/min]	v_c	35 m/min	Počet záběrů	i					
	Otáčky [ot/min]	n		Délka záběru [mm]	l					
	Posuv [mm/ot]	f_{ot}	0,15 mm/ot	Hl. zapichování [mm]						
	Posuv [mm/zub]	f_{zub}		Povrchová kúra	N					
	Posuv [mm/min]	f_{min}		Přerušovaný řez	N					
	Hloubka řezu [mm]	a_p	1,50 mm	Chladicí kapalina	N					
	Šířka fréz. plochy [mm]	a_e		Tuhost soustavy Stroj-Obrobek-Nástroj						
	Stoupání závitu [mm]	t		Čas jednoho záběru [min]						
Hodnoceno podle: T - trvanlivost			Kritérii opotřebení: VBb=0,3 VBc=0,6 VB2=0,25							
Výrobce	Destička	Utvařec	Jakost	Substrát	Povlak	Vzorek	T [min]	Průměr [mm]	K - řezivost	Rozptýl
PRAMET	CCMT09T304E	FM	T8315	-	-	A2	7,0 min	7,0 min	100 %	50,0 %
						A3				
Safety	CCGT09T304	PM2	9605	-	-	B1	12,0 min	12,0 min	171 %	50,0 %
						B2				
Safety	CCGT09T304	PM5	9605	-	-	C1	14,0 min		184 %	50,0 %
						C2				

Obr. 21: Protokol DormerPramet

K dispozici máme tři vzorky stejné VBD z nichž každá s jiným utvařecem.


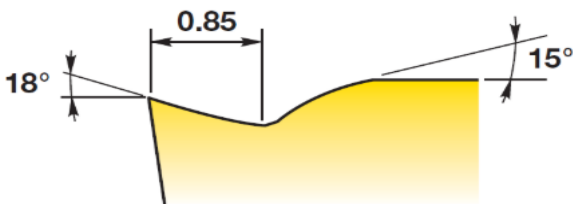
- 1) VBD destička CCMT09T304E s utvařecem FM od výrobce Pramet Tools s.r.o.



Obrázek 22: Geometrie utvařeče FM


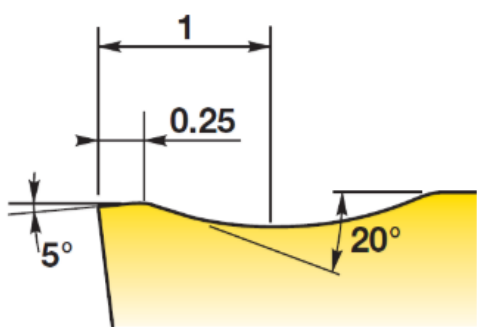
1) Destička CCGT09T304

a) S utvařečem PM2

Positive geometry	Chipbreaker profile
<p>PM2</p> 	 <ul style="list-style-type: none">• Finishing / semi-finishing applications• Positive cutting edge for reduced forces• Broad chip-control application range• Excellent profiling capability

Obrázek 23: Geometrie utvařeče PM2

b) S utvařečem PM5

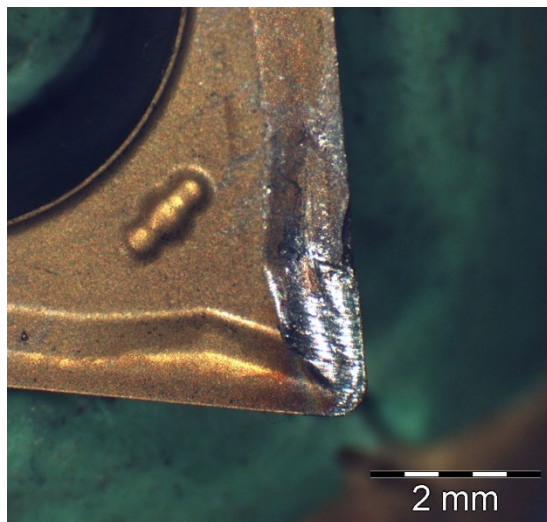
<p>PM5</p> 	 <ul style="list-style-type: none">• Semi-finishing to light roughing• Medium feed rates• Medium depths of cut
--	--

Obrázek 24: Geometrie utvařeče PM5

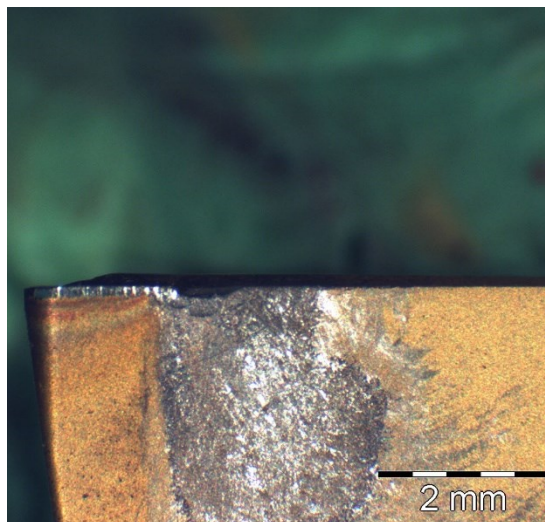
4 DISKUZE EXPERIMENTŮ

V tomto experimentu pozorujeme a následně komentujeme opotřebení tří testovaných VBD na čele a na hlavním hřbetu nástroje.

4.1 Vzorek č. 1 – utvařeč FM

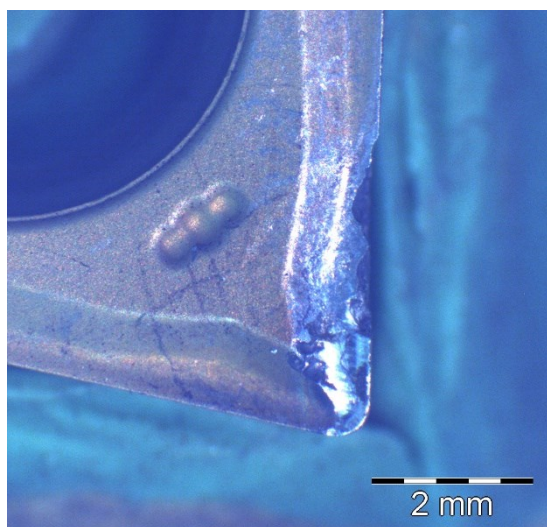


Obr. 25 – Vzorek č.1 - čelo, $t = 3 \text{ min}$

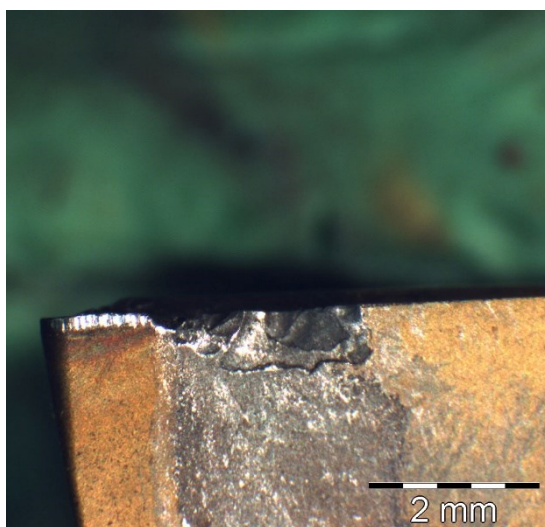


Obr. 26 – Vzorek č.1 - hřbet, $t = 3 \text{ min}$

Po prvních třech minutách je vidět znatelné poškození řezné hrany. Je to proto, protože tahle destička je poměrně ostrá a žlábek této destičky na tento druh obráběného materiálu je poměrně úzký. Na obrázku čela můžeme vidět, že materiál se nám opírá jak ve vstupní, tak ve výstupní části. Dále zde vidíme, že poškození čela je až na konci záběru, což může být způsobeno špatným utvářením třísky nebo zpevněnou povrchovou vrstvou materiálu.



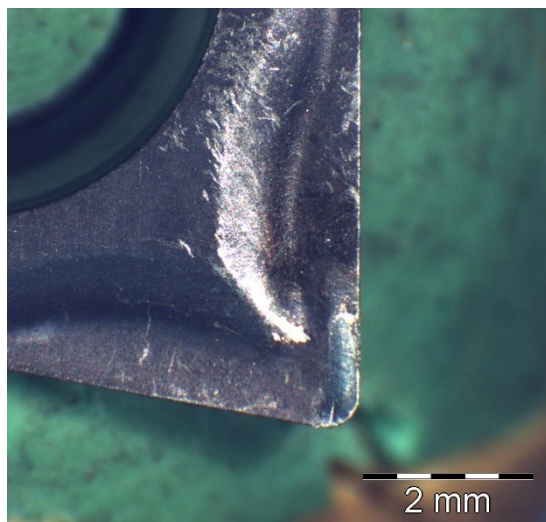
Obr. 27 – Vzorek č.1 - čelo, $t = 7 \text{ min}$



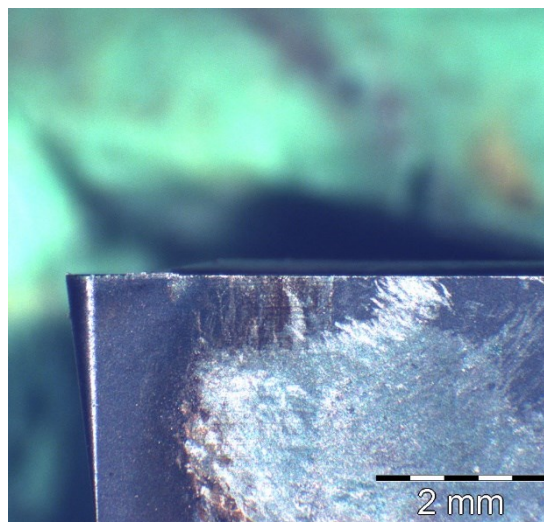
Obr. 28 – Vzorek č.1 - hřbet, $t = 7 \text{ min}$

Tady už opotřebení měřeno na hřbetě překročilo hodnotu 6/10. Opět je tady vidět to vyštípání řezné hrany. Díky silám působící kolmo ze shora na čelo nástroje, došlo po sedmi minutách k překročení pevnosti břitů a vyštípnutí řezné hrany záběru.

4.2 Vzorek č. 2 – utvařec PM2

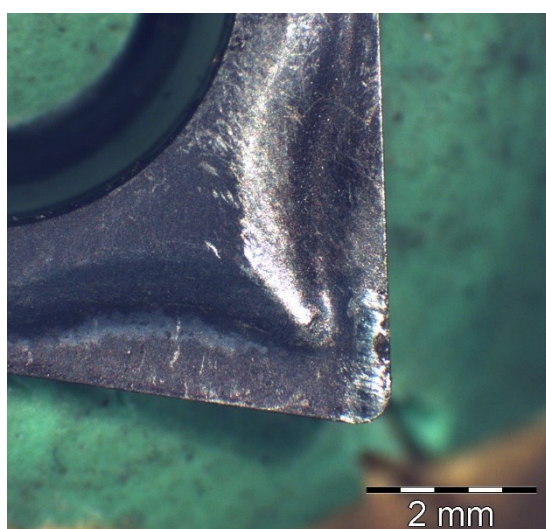


Obr. 29 – Vzorek č.1 - čelo, $t = 3 \text{ min}$

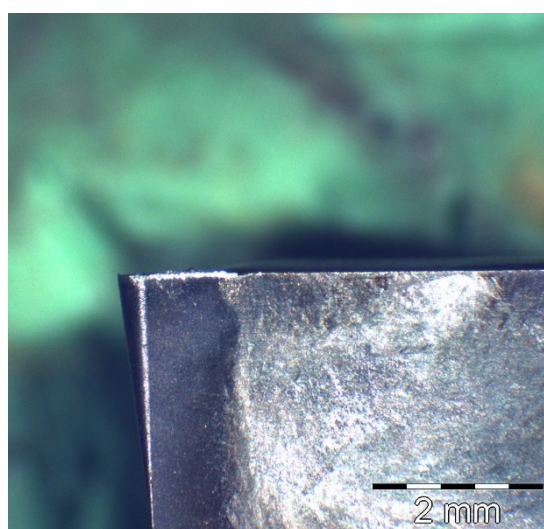


Obr. 1 – Vzorek č.1 - hřbet, $t = 3 \text{ min}$

Po 3 minutách je vidět, že tento utvařec tomuto obráběnému materiálu vyhovuje daleko lépe než předchozí vzorek, protože jeho žlábek je širší. Není tady tak odřená výstupní plocha oproti předchozí destičce tzn., že zde bylo měkčí utváření a tím pádem nižší řezné síly. Z pohledu hřbetu je vidět jenom nepatrné opotřebení hlavního hřbetu. Po detailním prozkoumání můžeme vidět malé nálepy obráběného materiálu na hřbetu, ale to je u slitin tohoto typu naprosto běžné.

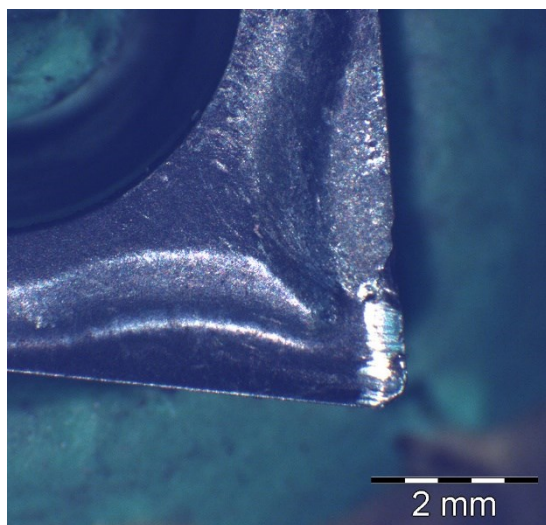


Obr. 31 – Vzorek č.1 - čelo, $t = 9 \text{ min}$

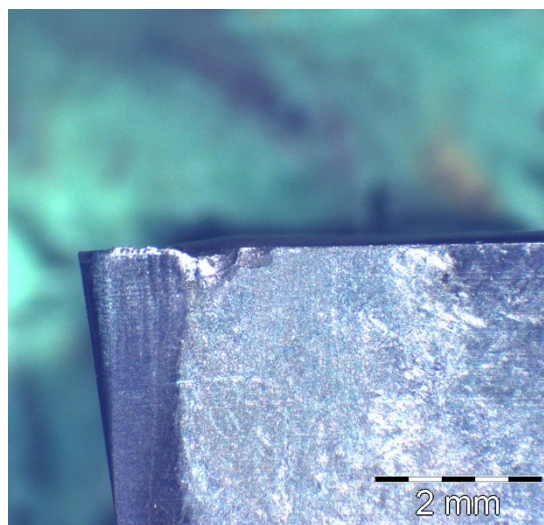


Obr. 2 – Vzorek č.1 - hřbet, $t = 9 \text{ min}$

V dalším úseku měření je vidět, že se nám trošičku mění kontakt třísky s čelem a zvyšují se síly blízko řezné hrany. Tím došlo k mikroporušení čelní plochy. Toto porušení nejde od čela, ale od hřbetu. Nálep obráběného materiálu se nám mírně zvýšil.



Obr. 3 – Vzorek č.1 - čelo, $t = 12$ min

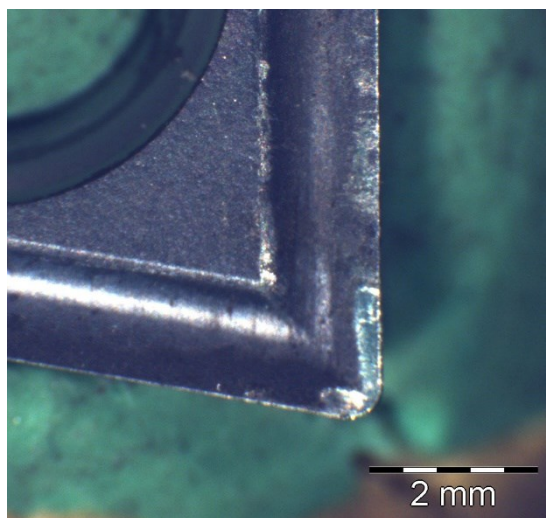


Obr. 34 – Vzorek č.1 - hřbet, $t = 12$ min

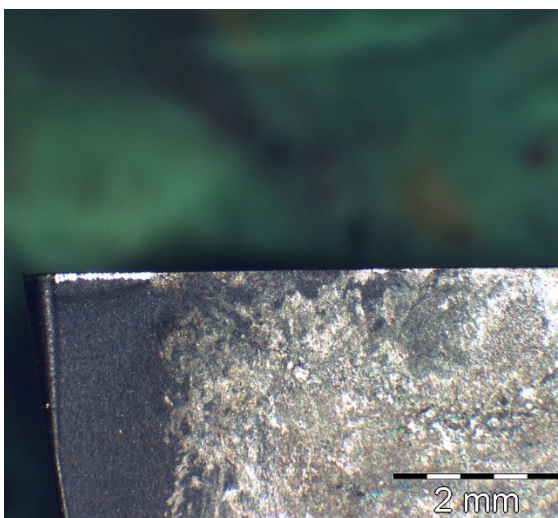
Ve dvanácté minutě se vytvořila rýha na konci záběru, která byla v tomto případě limitním kritériem.

Tenhle utvařeč je pro tento materiál daleko vhodnější. Oba dva tyto utvařeče jsou bezfazetkový. Jsou relativně ostré. Destička č. 2 by byla velmi vhodná pro obrábění toho materiálu za předpokladu idelání tuhosti soustavy stroj nástroj obrobek.

4.3 Vzorek č. 3 – utvařeč PM5

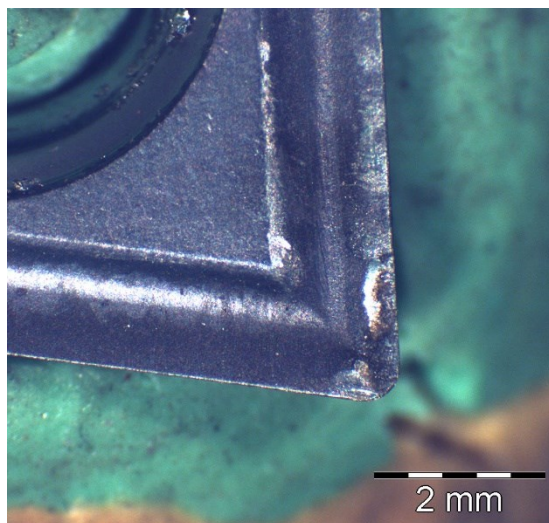


Obr. 35 – Vzorek č.1 - čelo, $t = 3$ min

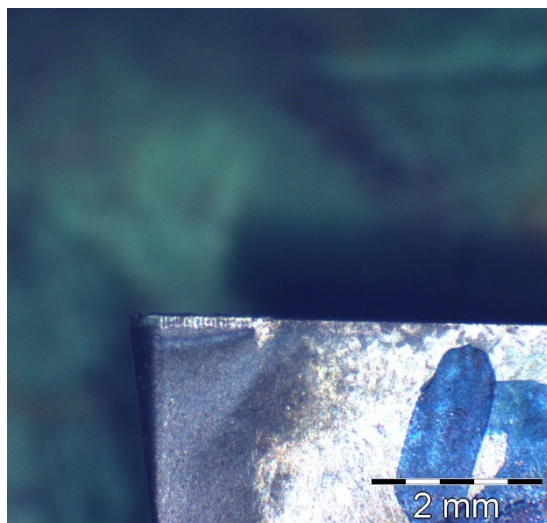


Obr. 36 – Vzorek č.1 - hřbet, $t = 3$ min

Jedná se o fazetkovanou geometrii. Je zde vidět dostatečný prostor pro třísku. Otěr na hřbetě je naprosto rovnoměrný. Dá se říci, že velice optimální.

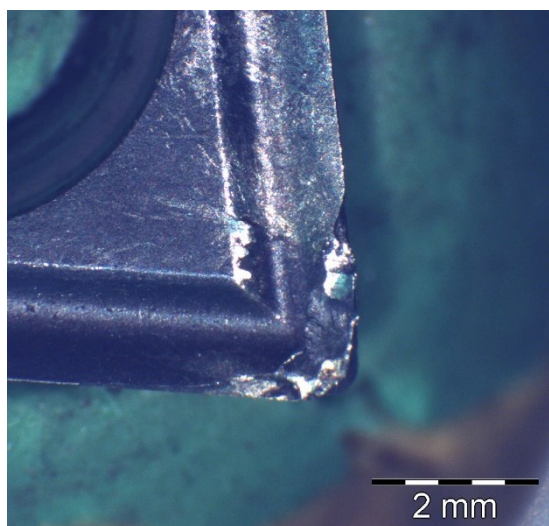


Obr. 37 – Vzorek č.1 - čelo, $t = 9$ min

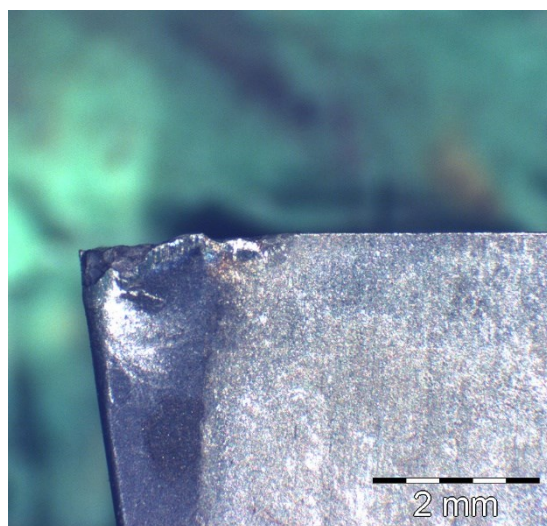


Obr. 38 – Vzorek č.1 - hřbet, $t = 9$ min

Po devíti minutách oproti ostatním destičkám je naprosto nesrovnatelná. Je zde vidět dostatečná pevnost řezné hrany. Nedochází k vyštípování řezné hrany, a to ani na konci záběru. Lze tedy předpokládat, že životnost této destičky bude největší, a že odejde na zvýšení radiálního odporu v důsledku opotřebení hřbetu. Na hřbetu v deváté minutě krásný rovnoměrný otěr.



Obr. 4 – Vzorek č.1 - čelo, $t = 14$ min



Obr. 40 – Vzorek č.1 - hřbet, $t = 14$ min

Ve 14 minutě došlo k velkému opotřebení hřbetu. Díky tomu se destička tvářila jako tupá a síly které jdou od hřbetu se výrazně zvýšily. Nárůst těchto sil způsobil vyštípnutí destičky na čele. Nejvíce to odnesla nejslabší část destičky, což je špička.

4.4 Zhodnocení vlivu mikrogeometrie

První vzorek vyhovuje provedením řezné hrany. Jedná se o ostrou geometrii. Ale pro daný materiál je až moc pozitivní, 18° pozitiv na čele a jeho žlábek je příliš úzký, což se projevuje velice tvrdým utvářením. Toto tvrdé utváření má ten dopad, že dochází ke koncentraci sil blízko řezné hrany a k jejímu vyštípnutí. Druhý utvařec je pro tento materiál daleko vhodnější. Oba tyto utvařeče jsou bezfazetkové. Jsou relativně ostré. Vzorek č. 2 by byl velmi vhodný pro obrábění tohoto materiálu za předpokladu ideální tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek.

Výsledek je takový, že nejlepších výsledků lze docílit geometrií pod označením vzorek č. 3, což je utvařec PM5. Opotřebení je rovnoměrné až do okamžiku, kdy dosáhne limitních hodnot, kde enormně naroste radiální odpor a způsobí až křehké porušení destičky. Měla by se používat destička č. 3 a hlídat opotřebení hřbetu.

4.5 Opotřebení nástroje


Značné opotřebení nástrojů při obrábění niklových slitin je zapříčiněno především nízkou tepelnou vodivostí niklových slitin. Uváží-li se malá plocha kontaktu třísky s čelem nástroje, má to za následek generování velkého množství tepla v místě řezu a následné vysoké lokální tepelné namáhání nástroje.

4.6 Doporučení při obrábění niklových slitin

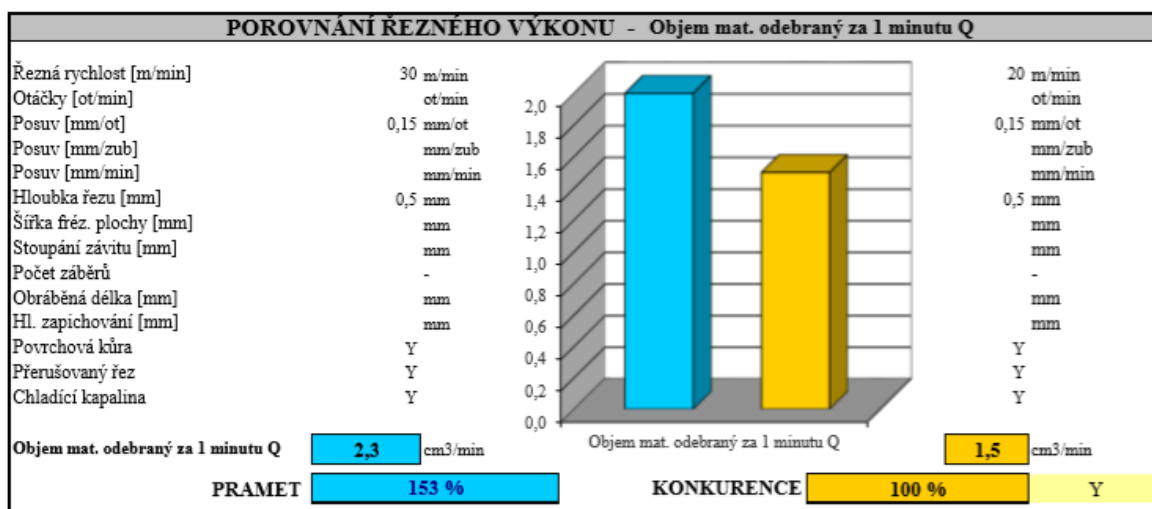
- **volit nízké řezné rychlosti:** nízká řezná rychlost znamená nižší tepelné namáhání nástroje a jeho delší trvanlivost
- **vysoké posuvy:** vyšší posuv znamená menší měrný tlak na nástroj, mimo to nemá významný vliv na teplotu nástroje. Též hloubka řezu by měla být větší než zpevněná vrstva po předchozím řezu
- **používat dostatečné množství procesní kapaliny:** chladicí kapalina odvádí teplo a třísky, čistí povrch, snižuje tření i řezné síly a prodlužuje trvanlivost
- **mít ostrý nástroj:** na opotřebovaném nástroji se tvoří nárustky, to snižuje jakost obrobenej plochy, způsobuje nalepování a vytrhávání a deformace obrobku,
- **používat dokonale tuhousoustavu** (stroj-nástroj-obrobek): tím se eliminují vibrace.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této části srovnáváme trvanlivosti a ekonomické parametry novější geometrie utvařeče s označením FM a materiálu T8330 oproti staršímu provedení s označením utvařeče R a materiálu 6640. Díky vlastnostem novějšího materiálu byla navýšena řezná rychlost z 20 m/min na 30 m/min. Posuv na otáčku a hloubka řezu zůstává stejný.

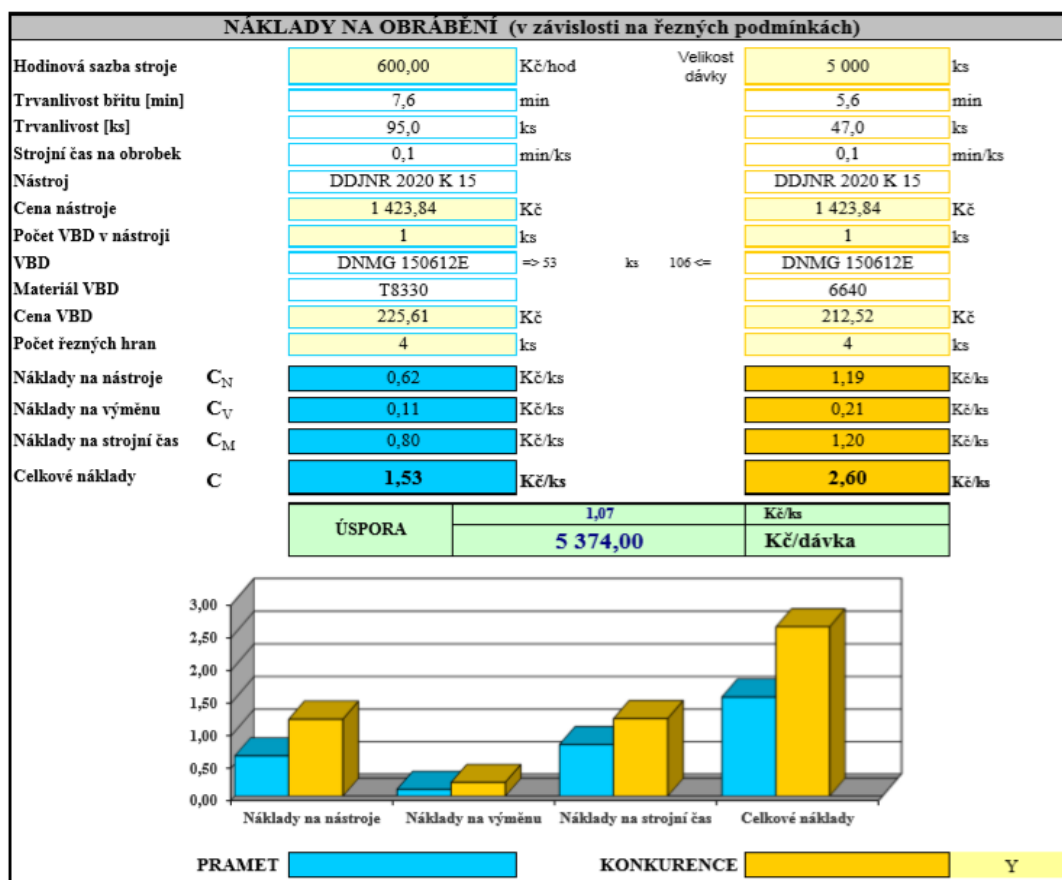
DORMER PRAMET		PROTOKOL O OBRÁBĚNÍ											
Firma		Navazuje na zkoušku										Technik	
		Datum										Místo zkoušky	
Stroj		Typ		SPT 16		Popis				Technologie		S	
		Výkon [kW]		75 %		Soustružení výstupku svaru inconelu a C45.							
		Techn.stav											
Obrobek		Název		Rotor svát C13 a C12									
		Požadovaná drsnost											
		Obr. materiál-Norma		Inconel 718									
		Skupina		S									
		Pevnost [MPa]		1 275 MPa									
		Tvrdost HB											
		Tvrdost HRC											
Chemické složení													
		C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Mo	W	Co	Ti	Fe	Al
Nástroj		Výrobce		PRAMET (Pramet news)				PRAMET				Poznámka	
		Označení		DDJNR 2020 K 15				DDJNR 2020 K 15					
		VBD		DNMG 150612E				DNMG 150612E					
		Utvařeč		FM				R					
		Jakost SK		T8330				6640					
Pracovní podmínky		Řezná rychlost [m/min]		V _c		30 m/min				20 m/min			
		Otáčky [ot/min]		n									
		Posuv [mm/ot]		f _{rev}		0,15 mm/rev				0,15 mm/rev			
		Posuv [mm/zub]		f _{tooth}									
		Posuv [mm/min]		f _{min}									
		Hloubka řezu [mm]		a _p		0,50 mm				0,50 mm			
		Šířka fréz. plochy [mm]		a _e									
		Stoupání závitu [mm]		t									
		Počet záběrů		i									
		Obráběná délka [mm]		l									
		Hl. zapichování [mm]											
		Povrchová kúra				Y				Y			
		Přerušovaný řez				Y				Y			
		Chladicí kapalina				Y				Y			
Vyhodnocení		Drsnost											
		Trvanlivost bříty [min]		T _{min}		7,6 min				5,6 min			
		Trvanlivost [ks]		T _{pcs}		95,00 pcs				47,00 pcs			
		VB [mm]		VB						135 % KONKURENCE			
		Křehká destrukce bříty								202 % KONKURENCE			
		Tvorba nárustku								KONKURENCE			
		Plast.deformace špičky											
		Druh třísky											
Tuhost soustavy Stroj-Obrobek-Nástroj													
Poznámka													
		Successful Stories		N		Technické hodnocení zkoušky				OK			
		Zahrnout zkoušku do celkového vyhodnocení:											
Příloha													

Obr. 41 – Protokol DormerPramet (novější utvařeč vs starší utvařeč)



Obr. 42 – Porovnání rezného výkonu

Testování probíhalo za stejných záběrových podmínek s tím rozdílem, že u novější geometrie utvařeče FM byla díky novějšímu materiálu, navýšena rychlost na 30 m/min. Z tohoto důvodu se zvýšila produktivita obrábění o 53%. Díky vyšší produktivitě jsme dosáhli vyšší životnosti nástroje, která se zvýšila o 2 minuty a v trvanlivosti na kus jsme se dostali až na dvojnásobek.



Obr. 43 – Náklady na obrábění

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je v teoretické části zaměřena na základní rozdělení a charakteristiku těžkoobrobitelných materiálů.

Cílem v praktické části této práce bylo porovnání mechanických vlastností typických zástupců superslitin s referenčním materiálem, který v tomto případě byla ocel 12 050.1 a jaký vliv mají tyto vlastnosti na jejich obrobitelnost. Největším problémem těchto materiálů je jejich nízká tepelná vodivost, která může za to, že daleko méně tepla se mi podaří dostat do třísky a tím pádem daleko více tepla půjde do nástroje.

Dalším cílem bylo porovnání vlivu geometrie vyměnitelné břitové destičky s různými utvařeči při obrábění niklové slitiny Inconel 718 za stejných řezných podmínek. Experiment se skládá ze tří vzorků. U prvního vzorku byla použita vyměnitelná břitová destička CCMT09T304E s utvařečem třísky FM. U druhého a třetího vzorku byla použita destička s označením CCGT09T304 s tím rozdílem, že u vzorku č. 2 s utvařečem PM2 a PM5 u vzorku č. 3. Po vyhodnocení experimentu jsme došli k závěru, že vzorek č.3 byl nejvhodnějším pro obrábění této slitiny a jeho životnost byla největší z testovaných vzorků, a to 14 minut.

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. za připomínky a rady. Firmě Pramet Tools s.r.o, za poskytnutí tématu. Dále děkuji Ing. Romanu Maršíčkovi za velmi cenné připomínky, rady nutné pro vypracování této práce a za poskytnuté materiály.

7 POUŽITÁ LITERATURA

[1] Obrobitelnost – Wikipedie. [online]. Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Obrobitelnost>

- [2] ČEP, R. *Technologie II - 1. díl* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [3] Skupiny obráběných materiálů. Document Moved [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 08.05.2018]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/workpiece_material_groups/pages/default.aspx
- [4] AB SANDVIK COROMANT Příručka obrábění. 1st ed. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [5] Interní zdroje a dokumenty společnosti Pramet Tools s.r.o.
- [6] ČADEK, J. *Creep kovových materiálů*. Praha: Academia, 1984. 271 s.
- [7] SMALLMAN, R.E. Moderní nauka o kovech. SNTL Praha, 1964. 318 s.
- [8] DURAND-CHARRE, M.: The Microstructure of Superalloys. Gordon & Breach science publisher, Amsterdam, 1997.
- [9] DONACHIE, M.J., DONACHIE S.J. Superalloys: A Technical Guide. Second Edition. Metals park, Ohio: ASM, cop. 1984. 412 p. ISBN 0-87170-170-7
- [10] Monika Losertová. PROGRESIVNÍ MATERIÁLY. [online]. [cit. 18.05.2018]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/PGM/Progresivni%20materialy.pdf>
- [11] Základy metalografie a tepelné zpracování. [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=44168&revision=-1&instance=2>
- [12] Wikipedie. Otevřená encyklopedie: Titan [online]. 2013. vyd. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_\(prvek\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_(prvek))
- [13] Nikl a jeho slitiny, titan a jeho slitiny (katalog). Západočeská univerzita v Plzni, Oddělení povrchového inženýrství, dostupné z: http://ateam.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf
- [14] PERONČÍK, Martin. Obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Brno, 2010. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=25826. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.

- [15] Titan (prvek) – Wikipedie. [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_\(prvek\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_(prvek))
- [16] Periodická tabulka prvků. Dostupné z: <http://www.labo.cz/mft/pt.htm>
- [17] SEDLÁČEK, Vladimír. Titan a jeho slitiny. Praha: ANTL, 1963. 206 s
- [18] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 396 s. ISBN: 80-7204-248-3
- [19] LEYENS, C., PETERS, M. Titanium and Titanium alloys. WILEY-VCH, 2002. 294 p. ISBN 3-527-30534-3
- [20] HLUCHÝ, Miroslav; KOLOUCH, Jan. Strojírenská technologie 1 : 1.díl, Nauka o materiálu. opravené vydání, dotisk. Praha : Scientia, spol. s.r.o., pedagogické nakladatelství, 1999. 216 s. ISBN 80-7183-150-6
- [21] Lockheed SR 71 Blackbird. kontrola rychlosti až www.PiNa.cz. www.PiNa.cz [online]. Dostupné z: <http://www.pina.cz/2016/02/18/lockheed-sr-71-blackbird-kontrola-rychlosti/>
- [22] Černé okamžiky v historii americké kosmonautiky - Požár v kabině Apolla 1 | Diit.cz. Diit.cz - Vybráno z IT [online]. Copyright © 1998 [cit. 09.05.2018]. Dostupné z: <https://diit.cz/clanek/cerne-okamziky-v-historii-americke-kosmonautiky>
- [23] MEDIN, a.s. [online]. Copyright © MMT0 [cit. 18.05.2018]. Dostupné z: <http://medin.cz/media/cache/file/a0/catalog-of-traumatology-angularly-stable-plates.pdf>
- [24] Kavítace – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>
- [25] Heat treatment and fine-blankin Inconel 718. RMZ – Materials and Geoenvironment [online]. 9.6.2008 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www.rmz-mg.com/letniki/rmz55/RMZ55_0163-0172.pdf